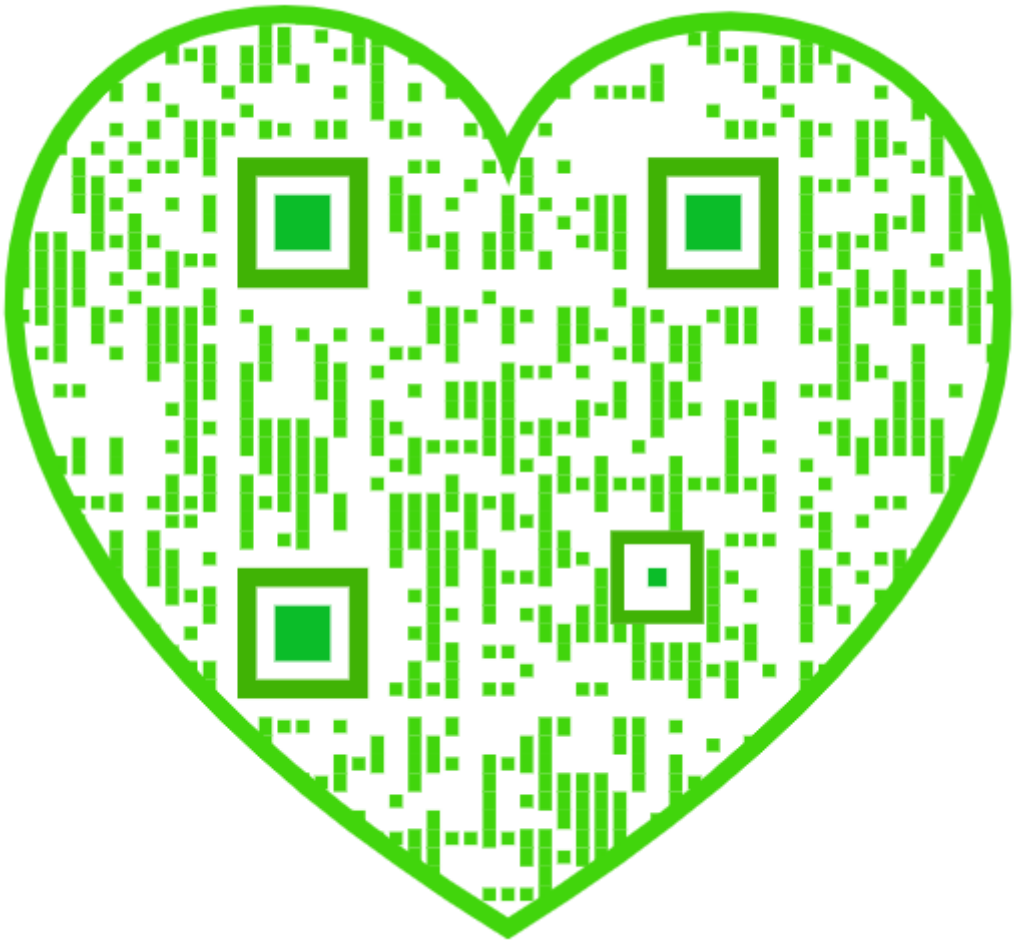
CHR. MOLLER EN EBBE RASMUSSEN

ATOMEN

EN

ANDERE KLEINE DEELTJES



ATOMEN EN ANDERE KLEINE DEELTJES

ATOMEN

EN

ANDERE KLEINE DEELTJES

DOOR

CHR. MÖLLER EN EBBE RASMUSSEN

MET EEN VOORWOORD VAN

PROF. NIELS BOHR

GEAUTORISEERDE VERTALING VAN

IR. JAN BOUTEN

H. P. LEOPOLD'S UITGEVERS MAATSCHAPPIJ N.V.
'S-GRAVENHAGE 1939

Oorspronkelijke Titel:

ATOMER OG ANDRE SMAATING

INHOUD

Voorwoord van Prof. Niels Bohr . . . . . Blz. 1
Voorwoord van de schrijvers 3
Inleiding 6
I. De tijd der groote ontdekkingen . . . 12
Radium 12
De ontdekking der electronen 24
Ionen en ioniseering van atomen 30
Lichtgevende atomen 36
Röntgenstralen 48
Photo-electronen en stralingsquanten 53
De ontdekking der atoomkernen 60
II. Het mysterie der atoomstructuur wordt onthuld 67
Bohrs atoomtheorie 67
De atoomtheorie wint veld 82
Oorzaak en ontstaan der Röntgenspectra . . 87
Het kaartsysteem der elementen en het atoomnummer 92
Atoommechanica en een weinig philosophie . 104
Laatste triomfen der atoommechanica . . . 118
III. Het raadsel der atoomkernen. – Het tijdperk der nieuwe ontdekkingen 124
Isotopen 124
Kunstmatige verandering der elementen . . 134
Kernsplitsing door kunstmatige projectielen. 140

De nieuwe elementairdeeltjes 146
Kunstmatige radio-activiteit 159
De techniek der atoomsplitsing 170
Kerntheorie en atoomenergie 183
Besluit 203
Naamlijst van de belangrijkste in de atoomphysica gebruikelijke deeltjes 207

LIJST DER PLATEN

Plaat		
I	Fig. 2.	Nevelkamerphoto van α-stralen.
	Fig. 3.	Nevelkamerphoto van hetzelfde praeparaat, doch sterker.
	Fig. 5.	Nevelkamerphoto van β-stralen.
II	Fig. 7.	De opstelling van een moderne condensatie- of nevelkamer.
	Fig. 9.	Photo van het ijzerspectrum tusschen 3600 Å en 3800 Å.
	Fig. 10.	Photo van de Balmerreeks in het ultraviolette deel van het waterstofspectrum.
III	Fig. 11.	Zeeman-effect.
	Fig. 13.	Interferentie van Röntgenstralen bij doorgang door een kristal van zinkblende.
IV	Fig. 15.	Nevelkamerphoto van een kernbotsing, waarbij een α-deeltje botst met de kern van een waterstofatoom.
	Fig. 16.	Nevelkamerphoto van de botsing tusschen een α-deeltje en een heliumkern.
V	Fig. 19.	Karakteristieke Röntgenspectra volgens Moseley.
	Fig. 20.	Vacuum-Röntgenspectrograaf volgens Siegbahn.
VI	Fig. 23.	Photo van interferentie van electronen bij doorgang door een platinakristal.
	Fig. 24.	De massaspectrograaf van Aston.

VII Fig. 25. Massaspectrogram van de vijf isotopen van zink.
Fig. 26. Photo van de roode spectraallijn van waterstof.
Fig. 28. Nevelkamerphoto van een kunstmatige elementenmutatie.

VIII Fig. 29. Nevelkamerphoto van de splitsing van een lithiumkern.
Fig. 30. De eerste nevelkamerphoto van een positron.

IX Fig. 31. Photo van de banen van een deeltjescomplex.
Fig. 32. Baan van een heliumkern.

X Fig. 33. Hoogspanningsinstallatie van 1 millioen Volt.
Fig. 34. Hoogspanningsinstallatie van 1.2 millioen Volt.

XI Fig. 36. De cyclotron van Lawrence.
Fig. 37. Het inwendige der cyclotron.

XII Fig. 38. De cyclotron in werking.
Fig. 39. Model ter illustreering van een atoomkernbombardement met snelle deeltjes.

VOORWOORD VAN PROF. NIELS BOHR

Het is mijn overtuiging, dat dit boek aan breede kringen een uitnemende gelegenheid zal bieden, kennis te maken met de sensationeele ontwikkeling, die de atoomphysica in onzen tijd heeft doorgemaakt. Het binnendringen in nieuwe werelden, die tot nu toe voor het menschelijk oog verborgen waren, heeft ons meer arbeidsmethodes der Natuur leeren kennen, dan wij ooit hadden kunnen vermoeden, terwijl het tevens, door een nieuwe belichting van onze eigen plaats als waarnemer der wereld om ons heen, ons inzicht in diepgaande problemen der kennisleer verruimd heeft.

Vooral ook de omstandigheid, dat dit boek ontstaan is als resultaat van de samenwerking van twee natuurkundigen, van wie één tot den kring der experimentators, de andere tot dien der theoretici behoort, moet geacht worden, er veel toe te hebben bijgedragen, dat de schildering van de wijze, waarop de nieuwe ervaringen opgedaan zijn, zoo wèl is afgewogen tegen de beschrijving, hoe men er in geslaagd is, die nieuw verworven kennis samen te voegen in het kader van zich regelmatig uitbreidende begripsverbanden.

Eveneens geloof ik, dat iedere lezer van dit boek er niet slechts een juiste voorstelling van zal krijgen, in welk een hooge mate de vooruitgang berust heeft op een voor beide partijen vruchtbare samenwerking tus-

schen onderzoek en techniek, maar bovendien er sterk door getroffen zal worden, dat een zoo hooge ontwikkeling van één der gebieden der wetenschap slechts mogelijk is gemaakt door een zeer nauwe samenwerking tusschen wetenschapsmannen van practisch alle cultuurkringen. De bescheiden bijdrage, die de enkeling aan deze samenwerking heeft kunnen schenken, ontleent haar waarde geheel aan haar inlijving in het groote bouwwerk van menschelijke gedachten, in laatste instantie gebaseerd op den drang, die iedereen eigen is, achter de veelvormigheid en de wisselingen der „rhapsodie van waarnemingen" orde en harmonie te zoeken.

NIELS BOHR

VOORWOORD VAN DE SCHRIJVERS

Waar de belangstelling voor de atoomphysica gedurende de laatste jaren sterk blijkt te zijn toegenomen, hebben wij gemeend, dat een samenvattende beschouwing over dit onderwerp, behandeld op een wijze, die het zonder speciale scholing begrijpelijk maakt, aan de wenschen van een uitgebreiden lezerskring met belangstelling voor de natuurkunde tegemoet zou komen.

Wij hebben daarbij een behandelingswijze gekozen, die den vooruitgang der moderne atoomphysica schildert van haar eerste begin aan het einde der vorige eeuw af, aangezien een uiteenzetting, die in groote lijnen de chronologische ontwikkeling volgt, den sterksten indruk zal geven van de resultaten, waarop het huidige atoomonderzoek mag bogen. Uit den aard der zaak kan men de atoomphysica niet behandelen, losstaand van de natuurkunde in het algemeen, waarmede zij organisch verbonden is, zoodat wij ons genoopt zagen, die algemeene natuurkundige en chemische begrippen, welke essentieel zijn voor het onderwerp, in het kort uiteen te zetten. Dit is gedaan, ten deele op die plaatsen in den tekst, waar zulks voor een goed begrip noodig was, ten deele in de inleiding, die tevens in het kort de ontwikkeling schildert, die het atoombegrip doorgemaakt heeft vóór het begin der moderne

atoomphysica. Op natuurlijke wijze is ons onderwerp te verdeelen in drie hoofdstukken, waarvan het eerste begint met de groote ontdekkingen van omstreeks 1900, die de grondslagen gelegd hebben voor de latere ontwikkeling, en eindigt met Rutherfords ontdekking van de atoomkern in 1911. Het volgende hoofdstuk behandelt dan de geheele atoomleer, beginnende met de revolutie, die Bohrs theorie in 1913 teweegbracht, en eindigende met de ontwikkeling der quantenmechanica tot omstreeks 1926. In dit hoofdstuk komen bijzonderheden voor, die misschien niet door iedereen bij de eerste lezing dadelijk geheel begrepen zullen worden, doch het ware nauwelijks mogelijk, de uiteenzetting dezer ingewikkelde theoretische vraagstukken nòg meer te vereenvoudigen, zonder dat een vertroebeling van het beeld, dat de atoomtheorie ons geeft van de kleinste deeltjes der materie, daarvan het gevolg geweest zou zijn.

Het derde hoofdstuk daarentegen, dat de experimenteele ontdekkingen der laatste jaren aangaande de atoomkern behandelt, zal weer zeer gemakkelijk toegankelijk zijn, terwijl voor een goed begrip daarvan geen nauwkeurige kennis vereischt wordt van alle bijzonderheden uit het meer theoretische gedeelte. Dit laatste hoofdstuk is bij tot en met het jaar 1938; van de allerlaatste ontdekkingen hebben wij echter slechts die vermeld, waarvan de juistheid boven elken twijfel verheven geacht moet worden.

Ten einde het lezen te vergemakkelijken, zijn al die technische bijzonderheden, welke niet absoluut noodzakelijk zijn voor een goed inzicht in den bouw der atomen, in kleine letter gedrukt, terwijl formules, die een meer wiskundige vorming bij den lezer veronder-

stellen, in noten aan den voet der pagina's zijn opgenomen. Ten slotte is, om het overzicht over de verschillende deeltjes, die in de wereld der atomen een rol spelen, te vereenvoudigen, daarvan achter in het boek een lijst opgenomen.

INLEIDING

Wanneer men eenmaal den kinderschoenen ontgroeid is, en het alphabet sinds lang geen raadselen meer herbergt, denkt men er in den regel niet meer over na, dat ieder boek, hoe verschillend de inhoud ook zijn moge, slechts een paar dozijn verschillende letterteekens bevat. Het is inderdaad verbluffend, dat men uitsluitend met behulp dezer letters in staat is, de vele duizenden woorden te scheppen, waaruit een taal bestaat. Maar even verbazingwekkend is het, dat de vele honderdduizenden onderscheidene stoffen, die men op de aarde gevonden heeft, bij nader onderzoek samengesteld blijken te zijn uit slechts 90 verschillende grondstoffen, de zoogenaamde elementen. Terwijl echter een kind gemakkelijk in staat is, te constateeren, dat ieder woord van een boek opgebouwd is uit eenige letters van het alphabet, was de taak, die de scheikundigen te volbrengen hadden: de ontsluiering van het Boek der Natuur, allesbehalve eenvoudig. De oorzaak daarvan was de onmogelijkheid, aan een gegeven stof zonder meer te zien, welke elementen zij bevat, aangezien een samengestelde stof steeds geheel andere eigenschappen heeft dan de enkelvoudige stoffen, waaruit zij bestaat. Het is bijvoorbeeld al zeer moeilijk aan een vloeistof als water te zien, dat zij is opgebouwd uit de gasvormige elementen waterstof en zuurstof, waarvan de eigen-

schappen zoozeer van die van water afwijken. Het was dan ook slechts met behulp van vèrstrekkende chemische analyses mogelijk, alle stoffen der aarde in twee hoofdgroepen in te deelen: de chemische verbindingen en de elementen.

Eeuwen vóór men met behulp der chemie tot de kennis kwam van den opbouw der stoffen, hadden geleerden evenwel reeds speculatieve beschouwingen geuit over den aard der materie, die de gedachte bevatten, dat iedere stof bestaat uit identieke kleine deeltjes, die niet verder verdeeld kunnen worden. Voor deze deeltjes gebruikten de Oude Grieken de benaming atomen, hetgeen „de ondeelbaren" beteekent.

Bij de ontdekkingen der 18de eeuw, die de eigenlijke chemie grondvestten, werd deze atoomvoorstelling plotseling actueel: van een stoutmoedige speculatie ontwikkelde zij zich snel tot een zeer nuttig denkbeeld, uitnemend geschikt als werkhypothese. De atomistische beschouwing werd daarbij scherp omlijnd door een onderscheid tusschen de kleinste deeltjes der chemische verbindingen, die den naam moleculen ontvingen, en die der elementen, voor welke de benaming atomen gereserveerd bleef. Uit het feit, dat een chemische verbinding nauwkeurig dezelfde eigenschappen vertoont, hoe klein de hoeveelheid ook is, die men onderzoekt, volgt, dat zelfs de kleinste deelen van een verbinding de elementen bevatten, waaruit die verbinding bestaat, m.a.w., dat ieder molecule opgebouwd is uit een aantal atomen der samenstellende elementen. Terwijl er dus slechts 90 soorten atomen bestaan, evenveel als er elementen zijn, kan het aantal soorten moleculen in de honderdduizenden loopen, overeenstemmend met het aantal chemische verbindingen.

Deze werkhypothese verschafte ook een natuurlijke verklaring van het fundamenteele verschijnsel, dat bij de analyse van een bepaalde chemische verbinding de samenstellende elementen steeds bleken voor te komen in een vaste gewichtsverhouding. Deze omstandigheid wordt onmiddellijk verklaarbaar wanneer men tevens aanneemt, dat de atomen van een bepaald element alle precies hetzelfde gewicht hebben. De atoomgewichten der onderscheidene elementen verschillen onderling echter wèl.

Het bepalen van de gewichtsverhouding der elementen in alle mogelijke verbindingen vormde voor de scheikundigen zoodoende een middel, de verhouding te vinden tusschen de gewichten der verschillende atomen. Ook het aantal atomen, dat een molecule van een verbinding bevat, kon worden vastgesteld. Zoo bleek bijvoorbeeld een molecule water te bestaan uit twee atomen waterstof en één atoom zuurstof, terwijl het atoomgewicht van zuurstof ongeveer 16 maal zoo groot is als dat van het eerstgenoemde gas.

Daarentegen kan men langs chemischen weg het werkelijke (absolute) gewicht of de absolute afmetingen der moleculen niet bepalen. Met behulp der sterkste microscopen, die deeltjes van minder dan 0.001 mm lengte nog zichtbaar maken, kan de opbouw der materie uit atomen nog niet waarneembaar gemaakt worden. De atomen moeten dus wel zeer klein, en haar aantal bijgevolg zeer groot zijn. Ongeacht het feit, dat de atoomtheorie zich zoo uitnemend geleend had tot een bevredigende verklaring van chemische verschijnselen, bleven er steeds nog verscheidene geleerden, zelfs tot aan het einde der vorige eeuw, die inwendig eenigen twijfel bleven koesteren aan het werkelijke bestaan der atomen. Men kon zich nauwelijks voorstellen, dat het ooit

mogelijk zou worden, de werking van afzonderlijke atomen waar te nemen. Intusschen bleek de atoomtheorie eveneens in staat, een dieper inzicht te verschaffen in verscheidene zuiver physische verschijnselen, in het bijzonder die van de welbekende begrippen warmte en temperatuur. Zelfs in een primitief ontwikkelingsstadium wist de mensch, dat warmte kon ontstaan door wrijving, welke kennis men benutte om vuur voort te brengen, door twee stukken hout krachtig tegen elkaar te wrijven.

Toen de chemie de geleerden vertrouwd had gemaakt met het atoombegrip, kwam men gemakkelijk tot de veronderstelling, dat warmte in werkelijkheid niets anders was dan een beweging van atomen en moleculen, die bijvoorbeeld te voorschijn kon worden geroepen door twee ruwe oppervlakken over elkaar te wrijven. Ook dit was natuurlijk slechts een werkhypothese, aangezien men door de geringe afmetingen der moleculen en atomen de veronderstelde beweging niet onmiddellijk kon waarnemen, doch de hypothese gaf een verklaring van zoo vele algemeen voorkomende verschijnselen, dat de atomistische opvatting der stof er een krachtigen steun door ontving.

Wanneer men met een vaste stof te doen heeft, bijvoorbeeld een stuk lood, mag men aannemen, dat de atomen dicht bij elkaar liggen en dat er sterke krachten op werken, die ze bij elkaar houden, zoodat de stof haar vorm bewaart. Overeenkomstig de hypothese over de warmte als beweging, zullen alle atomen slingeringen uitvoeren om hun evenwichtsstand, slingeringen, die grooter worden, naarmate de temperatuur stijgt. Bij toenemende verwarming treedt een moment in, waarop de slingeringen zóó groot worden, dat de atomen zich

losrukken uit hun evenwichtsstand en zich vrij gaan bewegen: het lood smelt. In de gesmolten loodmassa blijken de atomen toch echter ook nog een zekere mate van samenhang te vertoonen, want zij blijven in het vat, waarin men het metaal verwarmde. Verhit men echter tot nog hoogere temperatuur, dan zullen de loodatomen een zoodanig hooge snelheid verkrijgen, dat de snelste het vloeistofoppervlak verlaten, hetgeen beteekent, dat het lood verdampt.

De atomistische opvatting der stof geeft dus ook een zeer aannemelijke verklaring voor de drie aggregatie-toestanden: den vasten, den vloeibaren en den gasvormigen; de overgang van den eenen toestand in den anderen blijkt te berusten op een verandering in den onderlingen afstand der atomen of moleculen. Deze warmte-theorieën werden spoedig zoo ver ontwikkeld, dat men de bewegingen der atomen in nauwkeurige berekeningen kon vastleggen; zelfs bleek het mogelijk, een eerste benadering te geven van het aantal atomen in een bepaalde hoeveelheid stof, en daarmede van het absolute gewicht en de afmetingen der atomen.

Waar men thans over meer directe methodes beschikt tot het bepalen dezer grootheden – methodes, die naderhand nog ter sprake zullen komen – en de oorspronkelijke werkwijze nog slechts historische beteekenis heeft, volstaan wij met de vermelding der resultaten. Men vond, dat 1 gram waterstof ongeveer 6×10^{23}, ofwel 600.000 millioen millioen millioen atomen bevat. Het gewicht van 1 waterstofatoom bedraagt dus $\frac{1}{6 \times 10^{23}}$ gram $= 1.6 \times 10^{-24}$ gram.

Toen men eenmaal het absolute gewicht van één soort atomen gevonden had, was het gemakkelijk, dat

der andere elementen te berekenen; de scheikundigen kenden immers reeds de verhouding tusschen de atoomgewichten der verschillende elementen. Ten slotte kon men ook een benaderde waarde opgeven van de afmetingen der atomen; de doorsnede bleek te liggen in de orde van grootte van één honderd-millioensten cm (10^{-8} cm). Deze uiterst kleine waarden voor de grootte en het gewicht der atomen, en het duizelingwekkend groot aantal daarvan droegen er uit den aard der zaak niet toe bij, de sceptici van de werkelijkheid van hun bestaan te overtuigen, aangezien het onwaarschijnlijker leek dan ooit, afzonderlijke atomen te zullen kunnen waarnemen. Aan de andere zijde neigden de aanhangers der atoomtheorie tot de overtuiging, dat in zekeren zin het einde van het natuurwetenschappelijke onderzoek in zicht gekomen was, omdat men meende, de geheimen van de kleinste bouwsteenen der materie ontsluierd te hebben.

In deze phase mengde de moderne atoomphysica zich in het geding met nieuwe ontdekkingen, die eenerzijds het afdoende bewijs leverden van het bestaan der atomen, doch die tevens aantoonden, dat de atomen niet, zooals tot toen aangenomen was, ondeelbaar waren, doch dat zij onder bepaalde omstandigheden gesplitst konden worden in nòg kleinere deelen, die verrassende eigenschappen bleken te bezitten. De oorspronkelijke beteekenis van het woord atomen ten spijt, is men den naam toch blijven gebruiken, en wel voor de kleinste hoeveelheden van een element, die nog alle chemische en physische eigenschappen van dat element vertoonen. Het is de opzet van dit boek, meer te vertellen van de moderne atoomphysica, die zich bezig houdt met den bouw der atomen en hun splitsing in nog kleinere deelen.

I

DE TIJD DER GROOTE ONTDEKKINGEN

De moderne atoomphysica nam een aanvang aan het eind van de vorige eeuw op een tijdstip, toen vrijwel alle natuurkundigen het erover eens waren, dat alle groote ontdekkingen reeds hadden plaats gehad. Men beheerschte toen ter tijd zoowel het gebied der mechanica, als dat van electriciteit en magnetisme, die te zamen een afgerond systeem schenen te vormen, dat geen plaats meer liet aan nieuwe ontdekkingen. Het algemeene inzicht was, dat het physisch onderzoek in hoofdtrekken voltooid was en nog slechts een taak had als grondslag der techniek. Maar juist toen begonnen merkwaardige ontdekkingen, die de wereld in verbazing brachten, en ten eenen male niet te rijmen waren met het wereldbeeld, dat de wetenschap zich toen gevormd had, elkaar in snel tempo op te volgen. De ontdekking van het radium, van de electronen en van de Röntgenstralen deden intusschen niet alleen de physische wetenschappen tot in haar grondvesten trillen, doch maakte bovendien de belangstelling gaande van breede lagen buiten den engen kring der natuurkundige onderzoekers.

Radium

Het grootste deel dier belangstelling ging intusschen stellig uit naar de radio-actieve stoffen met haar ge-

heimzinnige stralen. Het was de Franschman Becquerel, die deze op het spoor kwam, toen hij in 1895 opmerkte, dat het ongewenscht was, photographische platen te bewaren in de nabijheid van bepaalde mineralen, aangezien deze onzichtbare stralen uitzonden, welke dóór het verpakkingsmateriaal heen, de platen kleurden, juist alsof deze aan het licht blootgesteld waren geweest. Een nader onderzoek naar het ontstaan van deze doordringende stralen toonde aan, dat verscheidene van de zeer zware elementen de merkwaardige eigenschap bezaten, onafgebroken en zonder uitwendige oorzaak stralen uit te zenden, die, behalve hun doordringingsvermogen en de eigenschap, op lichtgevoelig materiaal in te werken, ook nog de minstens even merkwaardige hoedanigheid bezaten, lucht van een isolator tot een geleider te maken. Men kon toen met nauwkeurige electrische meetinstrumenten het geleidingsvermogen der lucht, door de straling veroorzaakt, bepalen, en kreeg zoodoende de beschikking over een uitstekend middel, de eigenschappen der stralen nader te onderzoeken en andere radio-actieve stoffen op te sporen. Met behulp van dergelijke methodes slaagde in 1898 het echtpaar Pierre en Marie Curie in Frankrijk erin, het sterkste en thans meest bekende radio-actieve element, het radium, te vinden, welks stralen zoo krachtig zijn, dat zij ook een biologisch effect bezitten. Het is vooral deze uitwerking, die radium bij het groote publiek een geheimzinnige, bijna romantische reputatie verschaft heeft. In den strijd tegen den kanker en andere ziekten ontving de medische wereld in het nieuw gevonden element een geneesmiddel met een schier tooverachtige uitwerking; alleen reeds de aanwezigheid dezer stof op het aangetaste lichaamsdeel deed de ziekte

verdwijnen. Maar de stralen bleken ook gevaarlijk te kunnen worden: een eenigszins langdurige bestraling met een betrekkelijk geringe hoeveelheid van het radioactieve element kon doodelijke gevolgen hebben. Verscheidene onderzoekers en geneeskundigen lieten het leven, vóór men een methode vond, die bescherming bood tegen de stralen. Het is begrijpelijk, dat zulke ervaringen onmiddellijk aanleiding gaven tot diepgaande onderzoekingen naar de eigenschappen der stralen. Spoedig bleek, dat er drie soorten van stralen waren: α-, β- en γ-stralen, die onderling verschilden in doordringingsvermogen en in de mate, waarin zij de lucht geleidend maakten voor electriciteit. De *α-stralen* hebben in zeer sterke mate de eigenschap, in te werken op photographische platen, en de lucht geleidend te maken; bovendien zijn zij in staat, zware brandwonden op de huid te veroorzaken. Het is echter gemakkelijk, zich tegen deze soort stralen te beschermen, aangezien alle werkzaamheid op een afstand van slechts enkele centimeters van het praeparaat een einde neemt. De α-stralen bezitten n.l. een scherp begrensd stralingsgebied in de lucht, slechts een weinig verschillend voor de α-stralen van verschillende stoffen.

De ontdekking, dat de α-stralen door een magneet beïnvloed konden worden, bracht de vraag naar hun aard tot oplossing. Zij worden door een magneet niet aangetrokken, zooals met een stuk ijzer het geval is, doch juist afgebogen, en wel in dwarse richting op den magneet. Dit verschijnsel nu is in de natuurkunde welbekend: een geleider, waardoor een electrische stroom gaat, wordt door een magneet beïnvloed met een kracht, loodrecht staande op de richting, waarin een stuk ijzer zich zou bewegen. Juist deze speciale richting der elec-

tromagnetische kracht maakt het bijv. bij het gebruik in electromotoren zoo gemakkelijk, een draaiende beweging te voorschijn te roepen. Waar nu de α-stralen door een magneet afgebogen worden in precies dezelfde richting als met een geleider geschiedt, waardoor positieve electriciteit stroomt, ligt het voor de hand, aan te nemen, dat de α-stralen bestaan uit een stroom positief geladen kleine deeltjes, die men α-deeltjes heeft genoemd. Naderhand zullen wij zien, hoe voortgezette experimenten met de afbuiging der α-stralen door een magneet deze veronderstelling ondersteunden, en hoe het mogelijk bleek, op grond daarvan de snelheid, de electrische lading en het gewicht der α-deeltjes te meten.

Ten einde de eigenschappen der β-stralen afzonderlijk te kunnen onderzoeken, is het voldoende, het radiumpraeparaat in een glasbuis te brengen; de α-deeltjes worden n.l. door den glaswand volkomen tegengehouden, terwijl de β-stralen dien ongehinderd passeeren. Hun doordringingsvermogen is aanzienlijk grooter dan dat der α-stralen; hun stralingsbereik in lucht bedraagt verscheidene meters. Ook zij maken de lucht geleidend, zij het in mindere mate dan de α-stralen. Door een magneet worden de β-stralen zeer gemakkelijk afgebogen, echter in een richting, die tegengesteld is aan die der α-stralen. Hun afbuigingsrichting komt overeen met die van negatieve electriciteit; men neemt daarom aan, dat zij bestaan uit negatieve deeltjes, β-deeltjes, weggeschoten door het radio-actieve praeparaat.

Omgeeft men deze stof met een metalen huls van slechts enkele millimeters dikte, dan worden ook de β-deeltjes volkomen tegengehouden en blijft slechts de γ-straling over. Deze is zoo ongeloofelijk doordringend,

dat zij niet merkbaar door lucht verzwakt wordt. Zelfs een looden plaat van 8 cm dikte is niet in staat, meer dan 1 procent der stralen tegen te houden. In het bijzonder van de γ-stralen wordt in de geneeskunde gebruik gemaakt, aangezien zij door hun groot doordringend vermogen een krachtige bestraling kunnen bewerkstelligen, zelfs in dikke gezwellen. Daarentegen is het, op denzelfden grond, ook zeer moeilijk, zich tegen de werking der stralen te beschutten.

Tracht men de γ-stralen te doen afbuigen onder invloed van een magneet, dan blijkt, dat deze ze in het geheel niet beïnvloedt, waaruit geconcludeerd kan worden, dat zij, in tegenstelling tot de α- en β-stralen, geen electrische lading bezitten, en dus van een geheel andere gesteldheid zijn.

Deze kennis van de karakteristieke eigenschappen der stralen was intusschen niet voldoende, het probleem van hun ontstaanswijze geheel op te lossen. Eerst een reeks belangrijke onderzoekingen van den Engelschman Rutherford en zijn leerlingen leidde tot een dieper inzicht in de verschijnselen, die de radio-actieve stoffen te voorschijn roepen.

In de eerste plaats ontdekte men, dat de radio-activiteit van een bepaald element niet beïnvloed werd door de omstandigheid, of het al dan niet gebonden was aan andere elementen, – een geheel nieuw verschijnsel, daar de eigenschappen van chemische verbindingen in andere gevallen sterk plegen te verschillen van die der samenstellende elementen. Ook ging men na, of het mogelijk was, de straling te beïnvloeden door verwarming, afkoeling en andere physische en ook chemische processen, doch de radio-activiteit toonde zich daarvan volkomen onafhankelijk. Het belangrijkste resultaat was

intusschen wel, dat men, dank zij zeer nauwkeurige metingen, aantoonen kon dat de sterkte der straling niet constant was, doch met den tijd in intensiteit afnam, hetgeen er op duidde, dat de hoeveelheid radioactieve stof verminderde door het uitzenden der stralen. Ten einde deze merkwaardige verschijnselen te verklaren, stelde Rutherford de op dat tijdstip buitengewoon gedurfde hypothese op, dat de radio-activiteit berust op een overgang van het eene element in het andere, een overgang, die uit zichzelf plaatsvindt, onafhankelijk van experimenteele beïnvloeding of van de chemische verbinding, waarvan het betreffende element deel uitmaakt. Volgens deze hypothese (genaamd desintegratie-theorie) zou de stralingsintensiteit op elk tijdstip nauwkeurig evenredig zijn met de hoeveelheid van het radio-actieve element, zoodat de straling tot de helft terugloopt, wanneer de helft van het element in een anderen vorm is overgegaan. Dank zij ongeloofelijk nauwkeurige microchemische onderzoekingen, gepaard aan regelmatige waarneming der stralingsintensiteit, gelukte het in den loop van enkele jaren, een volledig inzicht te verkrijgen in deze radio-actieve omzetting, waarbij bleek, dat Rutherfords werkhypothese in alle details bevestigd werd, zoodat zij voortaan als een vaststaand feit aangemerkt mocht worden.

Om een iets duidelijker voorstelling te krijgen van den gang van zaken bij radio-actieve omzettingen, zullen wij ons voorstellen, dat wij ongeveer *f* 80.000 beschikbaar hebben voor den aankoop van 1 gram radium, dat wij, in versch bereiden toestand, ontvangen in een gesloten glazen buisje, beschermd door een platina kokertje. Wanneer wij nu met onze stralingsonderzoekingen willen beginnen, doen wij de teleurstellende

ontdekking, dat het buisje in het geheel geen stralen uitzendt. De verklaring daarvan is gelegen in het feit, dat zuiver radium zelf slechts α-stralen uitzendt, die niet eens door het glazen buisje vermogen heen te dringen, laat staan door het platina omhulsel. Oefenen wij echter slechts enkele dagen geduld, dan blijkt het praeparaat een doordringende γ-straling te bezitten, die elken dag krachtiger wordt, tot zij na ongeveer een maand haar volle sterkte heeft bereikt. Oogenschijnlijk blijft de activiteit dan verder constant. Wanneer wij nu het platinahulsje verwijderen, constateeren wij, dat intusschen ook een β-straling is ingezet. Hoe moeten wij dezen gang van zaken verklaren? Terwijl wij het buisje bewaarden, is een fractie van ons bezit aan radium veranderd in andere radio-actieve elementen: onder de uitzending van α-deeltjes gaat het metallisch zuivere radium over in een gasvormig element, dat radium-emanatie genoemd wordt. Dit gas is zelf ook radio-actief en zendt eveneens α-deeltjes uit, waarbij het op zijn beurt verandert in een derde radio-actieve stof, die weer vast is en radium A heet.

Wanneer wij in het glazen buisje voorzichtig een opening maken, kunnen wij de emanatie met een luchtpomp in een ander vat brengen, zoodat wij de eigenschappen van het gas afzonderlijk kunnen onderzoeken. Wij bevinden dan, dat het, zooals reeds aangegeven, α-stralen uitzendt, doch de straling vermindert zoo snel, dat zij na verloop van nauwelijks 4 etmalen nog slechts de halve sterkte bezit. Tevens is de helft van de emanatie verdwenen, van welk feit wij ons dadelijk kunnen overtuigen door het volume te meten. Het verdwenen deel der emanatie is immers overgegaan in de vaste stof radium A, die, in verhouding tot het

gas, een te verwaarloozen kleine ruimte inneemt. Op dezelfde wijze heeft iedere radio-actieve stof zijn vasten desintegratietijd, die gewoonlijk als halveeringstijd wordt aangegeven: de tijd, die verstrijkt, tot de helft van het element in een ander is overgegaan, en de stralingssterkte tot de helft is afgenomen. Terwijl het radium zelf een halveeringstijd heeft van 1600 jaar, en emanatie een van 4 dagen, wordt het radium A in slechts 3 minuten gehalveerd tot radium B, dat op zijn beurt na 27 minuten reeds voor de helft is omgezet in radium C, enz. Intusschen wordt niet het geheele

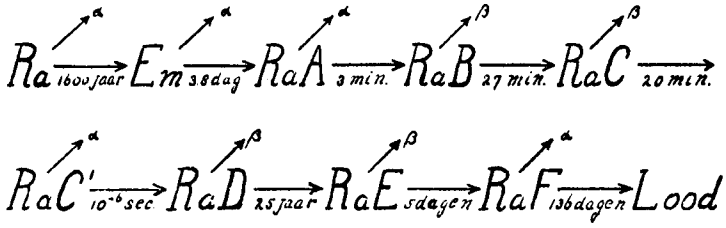


Fig. 1. De stamboom der radiumfamilie. De afkortingen Ra en Em beteekenen radium en emanatie; verder zijn aangegeven de halveeringstijden en de soorten der straling

alphabet op deze wijze doorloopen: de desintegratie gaat slechts enkele schreden verder. Alsdan is een geheele zoogenaamde radio-actieve familie ontstaan, die in beeld gebracht kan worden als figuur 1 aangeeft. Daaruit blijkt ten eerste, dat de verschillende leden dier familie ieder hun karakteristieken halveeringstijd en straalsoort hebben, en voorts, dat de desintegratie ten slotte eindigt, doordat het laatste lid niets anders is dan doodgewoon lood, dat, zooals een ieder weet, niet radio-actief is.

Zooeven hebben wij verondersteld, dat het buisje geopend en de emanatie weggepompt werd. Laat men

echter dit gas te zamen met het radium in het buisje verblijven, dan kunnen de radio-actieve omzettingen ongehinderd voortgang vinden. Bij de desintegratie van het radium ontstaan nu regelmatig nieuwe hoeveelheden emanatie, zoodat er een evenwichtstoestand bereikt wordt, waarin op elk oogenblik evenveel emanatie uit radium gevormd wordt, als er emanatie overgaat in radium A. Hetzelfde geldt voor de andere elementen, zoodat na een voldoende lang tijdsverloop de geheele familie voltallig zal zijn, en aanwezig in een hoeveelheid, die afhankelijk is, eenerzijds van de snelheid, waarmede elk lid gevormd wordt uit het moederproduct, anderzijds van die, waarmede het zelf in het dochterproduct overgaat. Ons gram oorspronkelijk geheel zuiver radium is dus na eenigen tijd uit zichzelf verontreinigd met een tiental nieuwe radio-actieve stoffen, en heeft daarmede tevens zijn grootste stralingsintensiteit bereikt.

De vele bijzonderheden, die de stamboom der radiumfamilie ons geleerd heeft, en welke overeenkomen met die van twee andere reeksen van radioactieve stoffen: de thorium- en de actiniumfamilie, mogen ons intusschen niet de hoofdzaak uit het oog doen verliezen, zijnde het feit, dat radio-activiteit gebonden bleek aan iets zoo revolutionnairs als het uiteenvallen van atomen, waarmede niet slechts het elementenbegrip, maar eveneens de tot op dat oogenblik gehuldigde atoomopvatting begon te wankelen. Een verandering van een element moet namelijk, overeenkomstig de definitie, van een atoom gegeven, als identiek beschouwd worden met atoomverandering. Men dient zich voor te stellen, dat een radio-actief proces daaruit bestaat, dat de afzonderlijke atomen in den vorm van

α- en β-deeltjes gedeelten van atomen wegslingeren, waarbij het overblijvende deel de atomen vormt van een nieuw element. Iederen keer, dat men een α- of β-deeltjes waarneemt, ziet men dus de omzetting van het eene element in het andere voor zich. Daarentegen is de uitzending van γ-stralen, die geen electrische lading meevoeren, slechts een begeleidingsverschijnsel van de α- en β-straling. De γ-straling op zichzelf speelt geen rol in de desintegratie der atomen, zoodat zij dan ook niet op den stamboom der radiumfamilie vermeld is.

De halveeringstijden van de verschillende leden dezer familie zijn niet alle gevonden door directe meting van de afname der stralingsintensiteit, hetgeen trouwens al dadelijk blijkt uit het feit, dat voor het radium zelf, dat nog slechts 40 jaar bekend is, een halveeringstijd van 1600 jaar genoemd wordt. Men beschikt echter ook over een andere methode ter bepaling van den halveeringstijd. Bij de stoffen van een radio-actieve familie, die den evenwichtstoestand bereikt heeft, zal men namelijk steeds de grootste hoeveelheid aantreffen van die elementen, die een langen halveeringstijd hebben. Een nadere beschouwing toont aan, dat de aantallen atomen, van de verschillende elementen gevormd, zich nauwkeurig verhouden als de halveeringstijden der stoffen, zoodat men uit een meting der hoeveelheden, in den evenwichtstoestand van elk element aanwezig, sommige halveeringstijden kan bepalen, indien andere reeds bekend zijn.

De radio-activiteit is in de geschiedenis der physica het eerste voorbeeld van de mogelijkheid, de processen van afzonderlijke atomen te bestudeeren, waarmede de, in de inleiding genoemde, hoofdbedenking tegen de atomistische opvatting der stof wegvalt. De radio-actieve stoffen kunnen ons tevens inzicht verschaffen in den bouw der atomen, doordat zij ons zelf de afzonderlijke atoomdeelen verschaffen voor een nader onderzoek, juist zooals een vulkaan den geologen materiaal levert voor de bestudeering van het inwendige der aarde.

Misschien is het hier de meest geeigende plaats, een

paar van de belangrijkste hulpmiddelen te noemen, die in de experimenteele physica gebruikt worden bij het onderzoek van radio-actieve processen, en waarvan er één het voordeel heeft, dat bijna iedereen in de gelegenheid is, het toe te passen, en zich op die wijze te overtuigen van de werkelijkheid der atoomprocessen. Hiermede doelen wij op de algemeen bekende lichtgevende horloges, welker cijfers en wijzers bedekt zijn met een uiterst dun laagje van een radiumzout, gemengd met een andere stof, zinksulphide, die de eigenschap bezit, een zwak schijnsel af te geven, wanneer zij getroffen wordt door α-deeltjes. Beschouwt men zulk een lichtgevenden wijzer door een vergrootglas in een donker vertrek, dan neemt men een prachtig vuurwerk waar van groene vonkjes, die op verschillende plaatsen ontbranden en weer uitdooven. Ieder van die vonkjes getuigt van de uitzending van een α-deeltje, zoodat men een zeer levendigen indruk krijgt van het feit, dat α-stralen uit afzonderlijke deeltjes bestaan.

Deze proef is meer dan een curiositeit, aangezien dezelfde methode in meer verfijnden vorm veel gebruikt is, om door middel van directe telling inzicht te verkrijgen in de radio-actieve verschijnselen. Men beschouwt daartoe onder het microscoop een klein, met zinksulphide bekleed schermpje, dat gebombardeerd wordt door α-deeltjes. Uit den aard der zaak eischen zulke directe tellingen de grootste inspanning van den waarnemer; wanneer de proef uitgevoerd wordt in een volkomen donker vertrek, terwijl het oog aan de duisternis gewend is, gelukt de telling met voldoende nauwkeurigheid, indien het aantal α-deeltjes niet meer bedraagt dan circa 30 per minuut.

Door de α-deeltjes te tellen, die in een bepaald tijds-

verloop een scherm treffen van bekende afmetingen, op een bepaalden afstand geplaatst van een eveneens bekende gewichtshoeveelheid radium, kan men het totale aantal α-deeltjes berekenen, dat het praeparaat in alle richtingen wegschiet. Door dergelijke tellingen heeft men vastgesteld, dat 1 gram radium per seconde in totaal $3{,}4 \times 10^{10}$ α-deeltjes uitzendt, hetgeen beteekent, dat per seconde een even groot aantal radiumatomen desintegreert. En waar men nu in den halveeringstijd de snelheid kent, waarmede radium omgezet wordt, en daarmede ook de hoeveelheid radium, die per seconde uiteenvalt, kan men langs dien weg het aantal radiumatomen berekenen, dat in 1 gram radium voorkomt. Dit blijkt $2{,}7 \times 10^{21}$ te bedragen. Tevens kan men nu berekenen, hoeveel atomen er voorkomen in 1 gram van een willekeurig element, door gebruik te maken van de reeds lang bekende verhouding van de atoomgewichten der verschillende elementen. Aangezien het atoomgewicht van radium 226 maal zoo groot is als dat van waterstof, zullen er in 1 gram waterstof 226 keer zooveel atomen voorkomen als in 1 gram radium, dus 6×10^{23}. Deze waarde stemt overeen met het aantal, dat in de inleiding genoemd werd, en dus ook met het daar vermelde absolute gewicht van een waterstofatoom.

Deze methode ter bepaling van het aantal en het gewicht der atomen is een der meest directe werkwijzen, waarover men beschikt, en het feit, dat zij voor het gewicht van het waterstofatoom dezelfde waarde vindt, als geheel andere methodes, is een doorslaand bewijs der juistheid, zoowel van de atoomvoorstelling, als van Rutherfords desintegratie-theorie.

Een nog sprekender, maar ook in haar uitvoering

moeilijker methode, bij radio-actieve processen de uitzending van afzonderlijke atomen zichtbaar te maken, bezit men in de zgn. condensatiekamer, (of nevelkamer; ook Wilsonkamer), waarin men, door speciale maatregelen, de α- en β-deeltjes ertoe brengen kan, hun spoor in den vorm van nevelstrepen zichtbaar te maken. Naderhand zullen wij gelegenheid vinden, op de inrichting en werking der condensatiekamer nader in te gaan; voor het oogenblik zullen wij er mede volstaan, een paar photographieën van zulk een nevelbaan te beschouwen. Figuur 2 (Plaat I) toont α-deeltjes van een thorium-praeparaat, dat een mengsel van twee stoffen bevat, die α-stralen uitzenden; men ziet de baan van twee soorten α-deeltjes, elk met hun eigen stralingsbereik. Figuur 3 (Plaat I) geeft een bijzonder fraaie opname van de baan van α-deeltjes van dezelfde stof, doch uitgezonden door een sterker praeparaat. Deze beelden toonen met voldoende duidelijkheid, dat de α-stralen bestaan uit afzonderlijke deeltjes, die zich, uitgaande van de radio-actieve stof, rechtlijnig voortbewegen.

Nu wij dan door de radio-actieve verschijnselen geleerd hebben, dat atomen samengestelde deeltjes zijn, aangezien zij zich kunnen splitsen onder uitzending van electrisch geladen partikeltjes, zullen wij ons een oogenblik wenden tot andere gebieden der physica, waar men eveneens reeds een vermoeden kreeg van de structuur der atomen.

De ontdekking der electronen

Tegenwoordig weet iedere radio-amateur, dat gloeiende stoffen electronen uitzenden, en dat dit bijzonder gewillige kleine dienaren zijn, die men ertoe kan bren-

gen, in een radio-ontvangtoestel te bewegen op de maat der tonen van een jazz-orkest, of met de snelheid van het licht beelden te teekenen op het scherm van een televisie-ontvanger. Maar deze dienaren, wier afmetingen de orde van grootte bezitten van die der atomen, heeft de menschheid niet steeds gekend. Hun ontdekking, die het moeizame resultaat was van zoowel theoretische, als experimenteele onderzoekingen van verscheidene geleerden en dus niet op naam van één man gesteld kan worden, was intusschen een der allerbelangrijkste vondsten, op het terrein der physica ooit gedaan.

Men had reeds lang speculatieve theorieën opgesteld over het wezen der electriciteit, en zich bijvoorbeeld afgevraagd, of een lichaam, dat een electrische lading ontvangt, al dan niet zwaarder wordt, of wat er eigenlijk gebeurt, wanneer een electrische stroom door een koperdraad gaat. Den nauwkeurigsten metingen ten spijt, was men er echter nimmer in geslaagd, eenige gewichtstoename te constateeren bij een lichaam, dat electrisch geladen werd. De beantwoording van dergelijke vragen werd vooral bemoeilijkt door het feit, dat electriciteit steeds gebonden scheen aan de materie. Daarom was het van zoo groote beteekenis, dat men er in slaagde, door middel van speciale maatregelen te bewerkstelligen, dat een electrische stroom zich losmaakte van de stof, om zijn weg zelfstandig door de ledige ruimte te vervolgen. Dit resultaat werd reeds bereikt omstreeks het midden der vorige eeuw door een electrischen stroom van hooge spanning te zenden door een bijna luchtledige glazen buis, waarin geleiders (electroden) ingesmolten waren van een vorm, als in figuur 4 is aangegeven. Men ontdekte toen, dat van de negatieve

electrode, de kathode, een rechtlijnige straling uitging, die zelf onzichtbaar was, maar waarvan het bestaan aangetoond kon worden, doordat zij den glaswand of andere vaste stoffen lichtgevend maakte, waar zij die raakte. Naderhand ontdekte men, dat deze stralen, die kathodestralen genoemd worden, zich van hun baan lieten afbuigen, zoowel door een magneet als door electrisch geladen lichamen, en wel in een zoodanige richting, dat daaruit geconcludeerd kon worden, dat men met een stroom negatieve electriciteit te doen had.

De eigenschappen der kathodestralen konden zonder

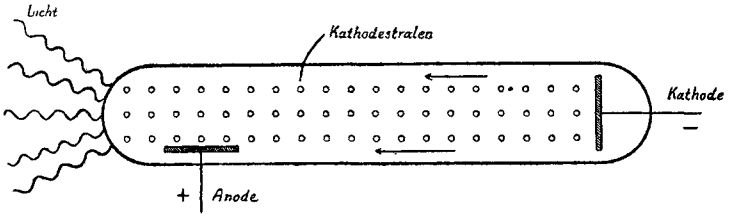


Fig. 4. Schematische teekening van een kathodestraalbuis

moeite verklaard worden, indien men aannam, dat de straling bestaat uit snel bewegende, uiterst lichte deeltjes, die alle dezelfde negatieve electrische lading bezitten. Zulke deeltjes zullen n.l. in het vacuum door de kathode afgestooten worden met een snelheid, afhankelijk van de spanning, waarmede de kathode geladen is.

Laten wij nu enkele eenvoudige beschouwingen opstellen over de wijze, waarop zulke electrische deeltjes beïnvloed worden door electrische en magnetische krachten. Wanneer een negatief geladen deeltje op korten afstand een positief geladen plaat passeert, dan zal het worden aangetrokken met een kracht, die grooter is, naarmate de electrische lading van het deeltje toe-

neemt. De grootte der afwijking van den rechtlijnigen weg, die daarvan het gevolg is, wordt echter mede beïnvloed door de zwaarte en de snelheid van het deeltje. Een zwaar en snel deeltje wijkt namelijk minder gemakkelijk van zijn baan af, dan een, dat licht is en zich langzaam beweegt, hetgeen voor niemand, die wel eens aan een of ander balspel heeft deelgenomen, geen openbaring zal zijn. Overeenkomstige beschouwingen kunnen opgesteld worden over de afbuiging van het deeltje onder invloed van een magneet met een bepaalde sterkte, zoodat men, door in beide gevallen de grootte der afbuiging te meten, eenig inzicht kan verwerven omtrent lading, massa [1]) en snelheid van het deeltje. Wel is waar is het niet mogelijk, met deze twee „vergelijkingen" de drie „onbekenden" te berekenen, doch wel de snelheid en de verhouding tusschen lading en massa.

Bij proeven met de afbuiging van kathodestralen onder invloed van electriciteit en magnetisme treffen de stralen den wand steeds op een scherp omlijnde plaats, waaruit volgt, dat alle deeltjes in dezelfde mate worden beïnvloed, zoodat zij identiek geacht moeten worden. Dank zij den experimenten, vooral ondernomen door den Engelschman Thomson, slaagde men er in, de snelheid te berekenen; deze bleek grooter te zijn, naarmate de spanning van den stroom, die in de kathodestraalbuis geleid werd, hooger was. De gevonden snelheid bedraagt gewoonlijk ongeveer 100.000 kilometer per seconde. De verhouding tusschen de lading en de massa der deeltjes bleek echter een geheel

1) In de physica gebruikt men het begrip massa in plaats van gewicht, wanneer men de traagheid van een lichaam ten opzichte van bewegingsveranderingen wil uitdrukken. Daar deze traagheid intusschen evenredig is aan het gewicht, drukt men de massa in dezelfde eenheid uit als het gewicht, namelijk in grammen.

onveranderlijke waarde te bezitten, hetgeen een krachtigen grond vormt voor de juistheid der veronderstellingen aangaande den aard der kathodestralen. Wanneer men er nu slechts in kon slagen, door een speciaal experiment de lading der deeltjes te meten, zou ook hun massa bekend zijn. Daar kathodestralen beschouwd kunnen worden als electriciteit „in reincultuur", mag op grond van de beschreven proeven aangenomen worden, dat electriciteit bestaat uit zeer kleine deeltjes, een soort electriciteitatomen, die men electronen genoemd heeft. De juistheid dezer veronderstelling, die de kern vormde van een reeks theoretische beschouwingen, door de natuurkundigen electronentheorie geheeten, werd bewezen door een zeer vernuftig experiment, waarbij het den Amerikaan Millikan gelukte, de hoeveelheid electriciteit te meten, waarover één electron beschikt. Hij beschouwde daartoe door een microscoop enkele uiterst kleine oliedruppeltjes, die zoo licht waren, dat hun val zeer traag verliep, en zij slechts langzaam door de lucht naar beneden zakten. Na er voor gezorgd te hebben, dat deze druppels een electrische lading ontvingen, nam hij waar, dat het mogelijk was, hun val te vertragen en te versnellen, door er boven of er onder een negatief geladen plaat aan te brengen. Hieruit bleek, dat ook de druppeltjes een negatieve lading bezaten. Met behulp van het microscoop mat hij nu de verandering in valsnelheid voor een groot aantal druppels, waaruit hij de grootte van hun lading kon berekenen. Deze hoeveelheid was niet steeds dezelfde, doch wèl bleek, dat de gevonden waarden en die van het kleinste bedrag, dat gemeten werd, zich steeds verhouden als eenvoudige geheele getallen. Deze minste hoeveelheid electriciteit, de zoogenaamde elementairlading, moest

gelijk zijn aan de lading van een electron, indien men aannam, dat de verschillende oliedruppels hun lading eenvoudig ontvangen hadden van één, twee of meer door hen opgenomen electronen.

Hiermede was de ontdekking der electronen om zoo te zeggen voltooid: men kende nu hun lading, en ook kon, dank zij den experimenten met de kathodestralen, hun massa berekend worden. Men vond daarvoor de waarde van 9×10^{28} gram. Waar het zeer moeilijk is, zich van zulk een klein bedrag een voorstelling te maken, kan het dienstig zijn, door een voorbeeld te verduidelijken, *hoe* klein een electron eigenlijk wel is. Wanneer men een koperen bol met een diameter van 1 meter laadt met een spanning van 1 millioen volt, hetgeen met de moderne hoogspanningsinstallaties, zooals er in figuur 33 (Plaat X) een is afgebeeld, juist binnen het bereik der mogelijkheden ligt, dan zijn daarvoor noodig ongeveer 100 millioen millioen electronen; het gewicht van den kogel is dan echter slechts toegenomen met een millioenste deel van een millioenste deel van een gram. Geen wonder, dat het niet mogelijk bleek, het gewicht van electriciteit door middel van directe wegingen te meten! Voor de natuurkundigen, die door de bepalingen van het absolute atoomgewicht gewend zijn geraakt aan kleine waarden, is de geringheid van het gevonden bedrag niet zóó imponeerend.

Maar interessant was voor hen in elk geval, dat een electron 1840 maal zoo licht bleek te zijn als het lichtste atoom, dat van waterstof, en men moest wel veronderstellen, in het electron een der bouwsteenen van het atoom gevonden te hebben. Dit vermoeden won aan waarschijnlijkheid, toen door nauwkeurige afbuigingsmetingen bleek, dat β-deeltjes precies dezelfde verhou-

ding tusschen lading en massa bezitten als de kathodestralen, zoodat men wel aan móét nemen, dat deze eenvoudig uit electronen bestaan. Slechts de snelheid der β-deeltjes is veel grooter dan die der kathodestralen; voor sommige stoffen vond men snelheden, welke die van het licht, 300.000 kilometer per seconde, benaderen. Uit figuur 5, (Plaat I), een photographie van de baan van β-deeltjes in de condensatiekamer, blijkt duidelijk, dat β-stralen bestaan uit afzonderlijke partikels. De opname is gemaakt in de nabijheid van een krachtigen magneet, onder invloed waarvan de rechtlijnige beweging in een cirkelvormige verandert, uit welker kromming men de snelheid der deeltjes kan berekenen.

Zoo spoedig men voldoende zekerheid had verkregen van het bestaan der electronen, ontdekte men ze bijna overal. De Engelschman Richardson toonde bijvoorbeeld aan, dat witgloeiende metaaldraden groote hoeveelheden vrije electronen uitzenden, een ontdekking, welke den grondslag gelegd heeft voor de thans zoo hoog ontwikkelde electronentechniek, die door radio, geluidsfilm, televisie enz. zulk een belangrijke rol is gaan spelen in het leven van den modernen mensch.

Ionen en ioniseering van atomen

Het feit, dat electronen een bestanddeel der atomen bleken te vormen, riep dadelijk nieuwe problemen in het leven, bijv. de vragen, hoe groot het aantal electronen in een atoom is, hoe zij zich bewegen, enz. Daar atomen in hun geheel electrisch neutraal zijn, lag het voor de hand aan te nemen, dat zij, behalve electronen, ook deeltjes zouden bezitten met een positieve lading, die

in totaal even groot is als de negatieve der electronen. Indien men er op een of andere wijze in zou kunnen slagen, eenige atomen te isoleeren, die een of meer electronen verloren hebben, zouden die atomen positief geladen moeten blijken te zijn. Men is er inderdaad in geslaagd, deze proef te doen, door de eerder genoemde kathodestraalbuis te voorzien van een kanaalvormig doorboorde kathode, zooals figuur 6 aangeeft. Men zal dan, behalve de gewone kathodestralen, een nieuwe straling waarnemen, die het kanaal passeert en zich voortzet in de ruimte daarachter, waar zij aan-

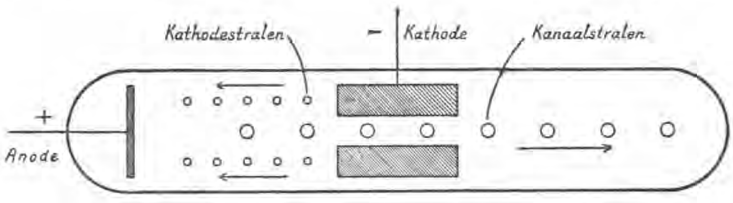


Fig. 6. Schematische teekening van een kanaalstralenbuis

getoond kan worden met behulp van een photographische plaat.

Met een methode, overeenkomstig die, gevolgd bij de kathodestralen, kan door middel van electrische en magnetische afbuigingsproeven aangetoond worden, dat deze zoogenaamde kanaalstralen bestaan uit positief geladen deeltjes. De afbuiging eischt intusschen veel grootere electrische en magnetische krachten dan voor de kathodestralen benoodigd waren. Dit berust op het feit, dat de deeltjes der kanaalstralen veel zwaarder zijn dan die der kathodestralen, zoodat wij hier kennelijk te doen hebben met de bovenbedoelde gezochte atoomresten, die ionen genoemd worden. Het blijkt, dat de eigenschappen der kanaalstralen, behalve van de elec-

trische spanning, die aan de buis medegedeeld wordt, ook in hooge mate afhankelijk zijn van de soort van het verdunde gas, dat de buis bevat, zoodat men dient te concludeeren, dat de kanaalstralen bestaan uit ionen, afkomstig van atomen van dat gas. Door in de buis verschillende gassen te brengen, zijn wij dus in staat, ons kanaalstralen, d.w.z. ionen te verschaffen van de atomen dier stoffen.

Intusschen vindt men voor een bepaalde gassoort twee of zelfs drie afbuigingsvlekken op de photographische plaat afgeteekend; bij meting blijkt, dat de betreffende ionen soms één, soms twee of drie positieve elementairladingen hebben bezeten, m.a.w., dat de correspondeerende atomen 1, 2 of 3 electronen verloren hebben. Daar de positieve lading der ionen, die precies gelijk moet zijn aan de negatieve, welke met de electronen verloren is gegaan, bekend is, kunnen wij, door de grootte der afbuiging te meten, juist als bij de kathodestralen gedaan werd, ook het gewicht der ionen bepalen en daarmede, aangezien de massa der electronen te verwaarloozen klein is, dat der atomen zeer nauw benaderen. Wanneer men waterstof als verdund gas gebruikt in de buis, vindt men voor het gewicht van een waterstofatoom $1{,}6 \times 10^{24}$ gram, hetgeen volkomen overeenstemt met de waarde, die in de inleiding is genoemd, en met het resultaat, dat bereikt werd door het tellen der α-deeltjes van radio-actieve stoffen. Gebruikt men kwikzilverdamp in plaats van waterstof, dan blijkt een kwikatoom 200 maal zoo zwaar te zijn als een waterstofatoom, hetgeen weer volkomen klopt met de door de chemici gevonden verhouding der atoomgewichten dezer stoffen. Terwijl men nu met de beschreven kanaalstraalbuis, die aan J. J. Thomson te danken is, slechts

Fig. 2. Nevelkamerphoto van α-stralen, uitgezonden door een thoriumpraeparaat, dat twee stoffen bevat, die beide α-stralen uitzenden, doch met verschillend doordringingsvermogen.

Fig. 3. Nevelkamerphoto van hetzelfde praeparaat als in het geval van fig. 2 gebruikt, doch veel sterker.

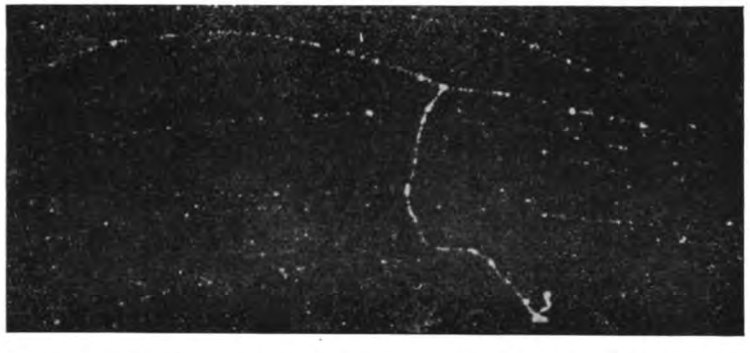


Fig. 5. Nevelkamerphoto van β-stralen, die van de rechterzijde af binnenvallen. De vertakking van een der banen is ontstaan door een toevallige botsing tusschen een β-deeltje en een electron, dat daardoor in beweging is gebracht en zelf een baan afteekent.

PLAAT II

Fig. 7. De opstelling van een moderne condensatie- of nevelkamer. Beneden de cylindervormige kamer, omgeven door een spoel, die het magnetische veld teweeg brengt, waardoor de deeltjes afgebogen worden. Boven een phototoestel, waarmede stereoscopische opnamen gemaakt kunnen worden, zoodat men de ligging der deeltjes in de ruimte kan vaststellen.

Fig. 9. Photo van het ijzerspectrum tusschen 3600 Å en 3800 Å.

Fig. 10. Photo van de Balmerreeks in het ultraviolette deel van het waterstofspectrum.

de absolute atoomgewichten der gasvormige elementen kan bepalen, heeft men later de methode zoodanig uitgebreid en geperfectionneerd, dat zij nauwkeurige atoomgewichtsbepalingen van alle elementen mogelijk maakte.

Aan electrische en magnetische afbuigingsproeven als voor de kanaalstralen beschreven, kan men ook de van radio-actieve stoffen uitgaande α-straling onderwerpen, waarvan immers reeds gebleken was, dat zij uit positief geladen deeltjes bestaat, juist als de ionen. Deze experimenten leidden tot een algeheele verklaring van de ware natuur der α-deeltjes, die identiek bleken te zijn met dubbelgeladen heliumatomen, d.w.z. heliumatomen, die twee electronen missen, aangezien de afbuigingsproeven van α-deeltjes dezelfde verhouding gaven tusschen lading en massa als die, welke men vindt voor dubbelgeladen heliumionen, wanneer men een kanaalstraalbuis met verdund helium vult. Het eenige verschil is, dat de snelheid van α-deeltjes, zooals zij weggeschoten worden door radio-actieve stoffen, veel grooter is dan van heliumionen met dubbele lading, wanneer zij een kathodestraal vormen. Het aantoonen van het feit, dat er positieve ionen gevormd worden, wanneer een atoom een of meer van zijn electronen verliest, verschafte de mogelijkheid, na te gaan, hoe het komt, dat de lucht geleidend wordt door de bestraling met α- of β-stralen. Wanneer men twee metalen platen op eenigen afstand van elkaar aanbrengt, de eene met positieve, de andere met negatieve electriciteit laadt, en dan met een gevoelig meetinstrument voor electrische stroomen (galvanometer) verbindt, dan zal dit normaal geen stroom aangeven, aangezien de lucht tusschen de platen niet geleidend is. Bestraalt men ech-

ter de tusschengelegen lucht met bijv. α-stralen, dan wijst de galvanometer stroom aan. De verklaring daarvoor is eenvoudig, dat de positieve α-deeltjes op hun weg door middel van de aantrekkingskracht, die zij op de electronen uitoefenen, enkele daarvan losrukken uit de luchtatomen, die daardoor tot ionen worden, of, zooals men zegt, geïoniseerd worden. Men krijgt dus tusschen de platen een mengeling van neutrale atomen, ionen (positief) en vrije electronen (negatief). De twee laatstgenoemde bestanddeelen worden aangetrokken, resp. afgestooten door de lading der metalen platen en daarmede is een electrische stroom tusschen deze beide tot stand gebracht.

De inrichting van de reeds eerder aangeduide condensatiekamer wordt ons thans eveneens duidelijk: ook daarvan berust de werking op ionisatie. C. T. R. Wilson, aan wien de constructie der condensatiekamer te danken is, was meteoroloog, en wat nog meer zegt, een Engelsch meteoroloog, zoodat hij wel op zeer vertrouwelijken voet moest staan met nevelvormingen. Hij wist dan ook zeer wel, dat een nevel slechts gevormd kan worden, wanneer lucht, behalve voldoende vocht, ook kleine partikels bevat, bijv. microscopische roet- of stofdeeltjes, waarop de waterdamp zich kan verdichten. Toen deed hij de gewichtige ontdekking, dat waterdamp ook de neiging heeft, zich te verdichten op de ionen, die de α-deeltjes op hun weg door de lucht vormen, zoodat hun baan door de lucht zich afteekent als een nevelstreep. Het probleem bestond dus nu nog slechts uit de moeilijkheid, een voldoende mate van vochtigheid der lucht teweeg te brengen op het moment, dat men die wenschte, en de gevormde nevelstrepen weer te verwijderen, nadat zij waren waarge-

nomen. Wilson loste het probleem op zeer vernuftige wijze op door de condensatiekamer den vorm van een cylinder te geven, waarin een zuiger kan bewegen, zoodat de vochtige lucht naar believen verdund of samengeperst kan worden. Bij een plotselinge verdunning koelt de lucht af, zoodat de waterdamp, dien zij bevat, de neiging vertoont, nevel te vormen, juist zooals dat na zonsondergang soms op warme dagen in de atmospheer geschiedt. De nevel in de kamer ontstaat evenwel slechts langs de baan der α-deeltjes, waar voldoende condensatiekernen in den vorm van ionen aanwezig zijn; door een zeer sterke belichting toe te passen, kan men de banen, die zich als lichtende strepen tegen een donkeren achtergrond afteekenen, photographeeren. Door daarna den zuiger weer neer te drukken, waardoor de lucht verwarmd wordt, verdwijnen de nevelstrepen onmiddellijk. Op figuur 7, (Plaat II), is een moderne condensatiekamer afgebeeld.

In figuur 5 hebben wij gezien, dat ook de β-deeltjes in de condensatiekamer gephotographeerd kunnen worden, hetgeen daarop berust, dat ook zij in staat zijn, lucht te ioniseeren door electronen uit de atomen weg te schieten. Daar β-deeltjes slechts een half zoo groote lading hebben als de α-deeltjes, bedraagt de electrische kracht, waarmede zij op de electronen in de atomen inwerken, ook slechts de helft. Daarentegen is de snelheid der β-deeltjes in den regel veel grooter dan die der α-deeltjes, zoodat zij ook veel minder tijd noodig hebben, een atoom te passeeren en daardoor slechts kort op de electronen daarvan kunnen inwerken. Beide factoren leiden ertoe, dat de β-stralen minder sterk ioniseeren dan de α-stralen, hetgeen zich kenbaar maakt, doordat de banen der β-deeltjes in de condensatiekamer veel dunner zijn dan die der α-deeltjes, terwijl men langs de baan de afzonderlijke waterdeeltjes kan onderscheiden, die figuren vormen, welke aan parelsnoeren herinneren. Op een condensatiekamerphoto kan men zoodoende gemakkelijk zien, of men met het eene dan wel het andere soort deeltjes te doen heeft. (Vergelijk figuur 2 en 5).

Wij hebben dus nu geleerd, dat atomen door inwerking van buiten af ertoe gebracht kunnen worden, elec-

tronen af te geven, en dat zij dan positieve ionen vormen. Hieraan dient echter nog toegevoegd te worden, dat deze verandering in den regel geen blijvende is, aangezien de gevormde ionen en de vrijgemaakte electronen groote neiging vertoonen, zich weer te vereenigen tot neutrale atomen. Bij de ioniseering van atomen heeft men dus in werkelijkheid te doen met een slechts tijdelijke atoomsplitsing, die door de atomen zelf na korteren of langeren tijd weer opgeheven wordt door hereeniging der brokstukken.

Lichtgevende atomen

Wij zullen ons thans wenden tot een oogenschijnlijk geheel ander gebied der physica, de spectroscopie, die zich bezig houdt met de onderzoeking van het licht, dat stoffen onder bepaalde omstandigheden uitzenden. Ook deze onderzoekingen hebben belangrijke bijzonderheden aan het licht gebracht over den bouw der atomen. Laten wij echter eerst in het kort even nagaan, wat licht eigenlijk is. Door talrijke geniale proefnemingen en vele daarop gebaseerde speculatieve beschouwingen kwam men in de vorige eeuw tot de overtuiging, dat licht moest bestaan uit electromagnetische golven, die zich van de lichtbron af in alle richtingen met een snelheid van 300.000 kilometer per seconde uitbreiden. Men dient zich voor te stellen, dat deze uitbreiding geschiedt langs bolvormige, concentrische golffronten in de ruimte, overeenkomstig de wijze, waarop golven, in een wateroppervlak veroorzaakt door daarin een steen te werpen, zich in concentrische ringen voortplanten in een plat vlak. In dezen tijd, waarin de radio gemeengoed is, mag als algemeen bekend verondersteld worden wat men verstaat onder electromagne-

tische golven en haar golflengte, zijnde de afstand tusschen twee op elkaar volgende maxima der electrische of magnetische kracht in die golven (zie figuur 8).

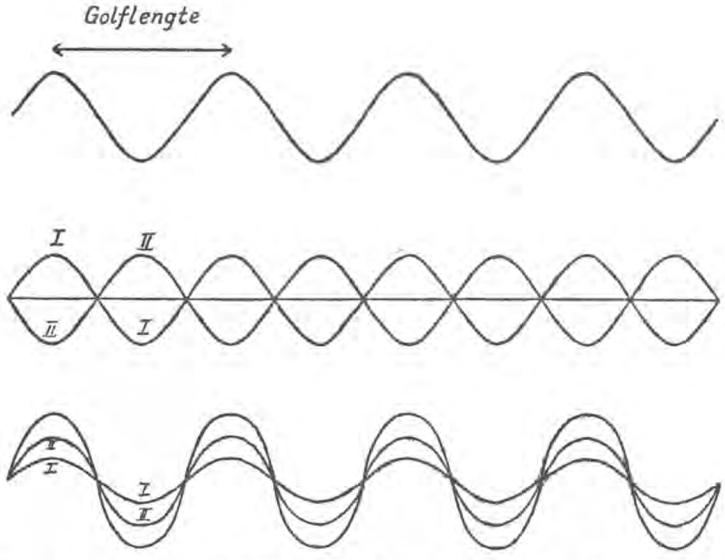


Fig. 8. Schematische voorstelling van golven en haar interferentie. Boven een „momentopname" der doorsnede van bijv. een watergolf met aanduiding der golflengte. Daaronder interferentie tusschen twee golven I en II met dezelfde golflengte, doch $^1/_2$ golflengte ten opzichte van elkaar verschoven, zoodat een golftop op een golfdal valt. Het resultaat is de horizontale lijn: de golven heffen elkaar geheel op.

Geheel beneden: interferentie tusschen twee golven I en II met dezelfde golflengte, doch met verschillende amplitude. De golven trillen met elkaar in de maat; golftop valt op golftop en golfdal op golfdal, met als resultaat een golf met dezelfde golflengte, doch met grootere amplitude. De golven versterken elkaar dus.

In de radio-programma's kan men de lengten aantreffen der electromagnetische golven, die de Europeesche zenders gebruiken; daarnaast echter treft men nog andere getallen aan, die de frequentie uitdrukken: het aantal golven, dat per seconde uitgezonden wordt. De fre-

quentie (het trillingsgetal) wordt aangegeven in Hertz of in kilo-Hertz; één Hertz komt overeen met 1 trilling per seconde. Vermenigvuldigt men de waarden, die van willekeurige stations voor golflengten en frequenties opgegeven worden, dan vindt men steeds eenzelfde getal. Voor Jaarsveld vindt men bijv. een golflengte van 415 meter bij een frequentie van 722 kilo-Hertz, hetgeen ongeveer 300.000 kilometer per seconde oplevert. Voor Hilversum met 1875 meter bij 160 kilo-Hertz, of 301,5 meter bij 995 kilo-Hertz, leveren de vermenigvuldigingen hetzelfde bedrag op. Dit berust natuurlijk daarop, dat de golflengte van een electromagnetische golf gelijk is aan den afstand, dien zij aflegt, terwijl zij een trilling volbrengt. In 1 seconde zal de golf een afstand afleggen, die evenvele malen grooter is dan de frequentie bedraagt. Het product van golflengte en frequentie levert dus de voortplantingssnelheid op, die constant is, en de bovengenoemde waarde van 300.000 kilometer per seconde bezit. Men kan dus naar keuze een golf karakteriseeren door frequentie of door golflengte; bij een groot trillingsgetal hoort een kleine golflengte, en omgekeerd.

Men moet aannemen, dat op overeenkomstige wijze als waarop radio-golven ontstaan, doordat de electriciteit in de zendantenne ettelijke honderdduizenden slingeringen per seconde uitvoert, lichtgolven ontstaan, doordat electrische ladingen in de atomen in trilling verkeeren. Intusschen zijn de golflengten der lichtstralen kleiner dan een duizendste millimeter, zoodat deze ladingen een trillingsgetal van eenige honderden billioenen per seconde moeten bezitten. Daar wij nu reeds gezien hebben, dat atomen electronen bevatten, ligt het voor de hand aan te nemen, dat deze een rol spelen bij de uitzending van licht. Door de studie van

lichtgevende atomen zou dan de gelegenheid geschapen worden, een inzicht te verkrijgen in het aantal electronen van een atoom en in de beweging, die zij uitvoeren.

Tot de groote ontdekkingen, omtrent de eeuwwisseling gedaan, moet men ook een reeks spectroscopische onderzoekingen rekenen, die, dank zij nauwkeurige metingen van golflengten van het licht, uitgezonden door atomen, interessante wetmatigheden aan den dag bracht. Het meten van zulke kleine golflengten als het licht bezit, kan natuurlijk niet geschieden met behulp van een gewone liniaal. Het eischt bijzondere methodes, die alle berusten op de speciale eigenschap van golven, onderling interferentie teweeg te kunnen brengen, d.w.z. elkaar te versterken of te verzwakken. Indien n.l. twee golven met dezelfde golflengte elkaar opvolgen, zooals in figuur 8 aangegeven, kan het gebeuren, dat de maxima der golven samenvallen, waardoor een versterking optreedt. Maar het kan ook voorkomen, dat de eene golf ten opzichte van de andere $^1/_2$ golflengte verschoven is, zoodat het maximum van de eene samenvalt met het minimum van de andere, en de golven elkaar verzwakken of geheel uitdooven, indien zij even sterk zijn. Het verzwakken door interferentie komt ook in de radio-techniek voor: het treedt op als de onaangename fading, wanneer van een bepaald radio-station één golf een omweg door de atmospheer bewandelt en, na terugkaatsing in de richting der aarde, samen komt met een andere golf, die den kortsten weg gevolgd heeft. Indien men de lengte van den omweg kende, zou men daaruit de golflengte kunnen berekenen, aangezien de afgedwaalde golf een halve golflengte of een oneven aantal halve golflengten achter de directe golf

moet aankomen, wil het resultaat uit een verzwakking kunnen bestaan. Hetzelfde beginsel nu wordt toegepast bij het meten van golflengten van het licht, in dier voege, dat men door spiegels of dergelijke het licht dwingt, een voldoende langen omweg af te leggen van bekende lengte, waarna interferentie optreedt met het direct doorgaande licht. Slechts wordt de omweg zoo gekozen, dat het afstandsverschil niet één golflengte bedraagt, doch bijvoorbeeld 20.000 lengten, zoodat men tot afstanden van eenige centimeters komt, die met voldoende nauwkeurigheid direct gemeten kunnen worden. Met behulp van zulke meetmethodes die tot de moeilijkste behooren, welke bestaan, heeft de Amerikaan Michelson de golflengte van het roode licht, uitgezonden door het element cadmium, bepaald op

0,000643 84696 millimeter.

Wanneer men werkt met golflengten, zoo klein als die van het licht, gebruikt men in de plaats van millimeters in den regel de eenheid Ångström (Å), die gelijk is aan 10^{-7} mm, en haar naam ontving als herinnering aan den Zweedschen natuurkundige Ångström, die als eerste tamelijk nauwkeurige metingen van de golflengten van het licht ondernam. Volgens deze eenheid krijgt het zooeven genoemde roode cadmiumlicht een golflengte van 6438,4696 Å.

Om de atomen ertoe te brengen, licht uit te zenden, gebruikt men verschillende methodes, die alle gemeen hebben, dat men eerst het betreffende element in dampvorm brengt, zoodat men de beschikking krijgt over vrije atomen, die dan onder electrischen invloed tot lichten gebracht kunnen worden. Dit bereikt men bijvoorbeeld door een kleine hoeveelheid van de stof in een vlamboog te brengen, of door vonken te laten overspringen tusschen electroden, gemaakt van de betreffende stof. Bij gasvormige elementen is het voldoende, een weinig daarvan in een eerst luchtledig gemaakte glazen buis te brengen. De welbekende neonlampen, die zooveel voor reclamedoeleinden gebruikt worden, zijn buizen van dezen aard.

Gewoonlijk bezit het licht, uitgezonden door een lichtend element, verschillende golflengten, die gescheiden kunnen worden met behulp van een spectroscoop, waarvan het voornaamste onderdeel uit een driezijdig glazen prisma bestaat. Zulk een prisma heeft n.l. de eigenschap, lichtstralen van hun oorspronkelijke richting te doen afwijken, in een mate, die afhankelijk is van de golflengte. Een lichtstraal, die door een prisma valt, zal zich zoodoende waaiervormig uitbreiden. Met behulp van een lens kan van het ontlede licht een langwerpig beeld gemaakt worden, waarop iedere soort van licht een eigen plaats heeft, overeenkomstig haar golflengte. Zulk een beeld heet spectrum en het blijkt nu, dat ieder element zijn eigen karakteristieke spectrum bezit, waarin de verschillende golflengten zich kenbaar maken als scherpe lichtende lijnen van verschillende kleur. De kleuren dezer zoogenaamde spectraallijnen treden op in een vaste volgorde: rood, geel, groen, blauw en violet, zooals ons de regenboog toont, die ook een soort spectrum is. Het menschelijk oog is n.l. zoodanig ingericht, dat het in staat is, binnen een bepaald bereik verschillen in golflengten waar te nemen: iedere golflengte wordt als een kleur vertolkt. Golven met een lengte van ongeveer 7000 Å worden als rood ervaren, die met een van 5000 Å groen en met 4000 Å als violet. Electromagnetische golven met een golflengte grooter dan 7600 Å en kleiner dan 4000 Å zijn voor het menschelijk oog niet zichtbaar; gemakkelijkheidshalve spreekt men echter toch van licht en noemt dat in het eerste geval ultraviolet, in het tweede infrarood. Het onzichtbare deel van het spectrum werkt echter wel in op photographische platen, waarop spectraallijnen uit het ultraviolette en infraroode deel zich afteekenen

als scherpe zwarte lijnen, welker plaats eveneens door de golflengte bepaald wordt. Figuur 9 van Plaat II toont fragmenten van het ultraviolette deel van het ijzerspectrum, dat gekenmerkt wordt door het bezit van bijzonder vele spectraallijnen.

Wanneer men in de practijk de golflengten der verschillende lijnen van een spectrum wil meten, vergelijkt men in den regel dat spectrum met een ander, waarvan de lijnen reeds eerder met behulp der interferentiemethode bepaald zijn. Tegenwoordig zijn de golflengten der meeste spectraallijnen van bijna alle elementen nauwkeurig bekend, hetgeen heel wat zeggen wil, wanneer men bedenkt, dat haar aantal in de honderdduizenden loopt. Het feit, dat elk element zijn karakteristieke spectrum heeft, vormt den grondslag der z.g.n. spectraalanalyse, de methode, met behulp van het spectroscoop vast te stellen, welke elementen een onbekende stof bevat. Deze techniek heeft een groote rol gespeeld, zoowel in de chemie als in de astronomie, aangezien men zelfs met zeer kleine hoeveelheden stof of over ontzaglijke afstanden in staat is geweest, de samenstelling te bepalen van mineralen in het eerste, van ver verwijderde zonnen en nevelvlekken in het tweede geval. Voorts heeft de spectraalanalyse geleid tot de ontdekking van geheel nieuwe elementen, doordat men nieuwe spectraallijnen ontdekte, die nog niet waargenomen waren in de spectra der tot op dat oogenblik bekende elementen. In het bijzonder de ontdekking van helium is merkwaardig, omdat men de aanwezigheid van dit element op de zon vaststelde, vele jaren, vóór het op aarde werd aangetroffen. Het ontving zijn naam dan ook naar de zon, in het Grieksch helios genaamd. Daar het heliumspectrum zich onderscheidt door een

bijzonder karakteristiek uiterlijk en bovendien teweeggebracht kan worden met uiterst geringe hoeveelheden van het edelgas, lag het voor de hand, dat de natuurkundigen zouden trachten, met behulp der spectraalanalyse het directe bewijs te leveren, dat α-deeltjes hetzelfde zijn als heliumionen. Dit bewijs leverde een bijzonder fraaie en vernuftige proef van Rutherford en zijn medewerkers, die α-deeltjes, afkomstig van radium, door een uiterst dunnen glazen wand zonden in een luchtledige ontladingsbuis. Na eenigen tijd begon deze een heliumspectrum te vertoonen, wanneer men er ontladingen in deed plaats vinden. De α-deeltjes hadden dus in de buis electronen ontmoet en deze daarbij van heliumionen in heliumatomen veranderd.

Vormde de spectraalanalyse aanvankelijk vooral een practische toepassing van de resultaten der spectroscopie, spoedig zagen de natuurkundigen in, dat ook de spectra zelf een studie meer dan waard waren. In de spectra van verscheidene elementen nam men namelijk waar, dat de spectraallijnen niet willekeurig verspreid optreden, doch op een meer of minder opvallende wijze door de hand der Natuur geordend zijn. Zeer in het bijzonder bleek dit verschijnsel zich voor te doen in die spectra, welke zoogenaamde series bevatten, waaronder men verstaat een reeks spectraallijnen, die, onder afname van golflengte of van sterkte, elkaar steeds meer naderen. Deze regelmatigheid trad in sommige spectra zoo duidelijk op den voorgrond, dat men zich afvroeg, of het mogelijk zou zijn, een eenvoudig verband te vinden tusschen de golflengten der verschillende lijnen van zulk een serie. Hierin slaagde voor het eerst de Zwitser Balmer, die in 1885 zulk een verband ontdekte

voor de lijnen van het waterstofspectrum. Figuur 10 op Plaat II toont, hoe duidelijk de reeksvorming bij genoemd spectrum is. Balmer nu constateerde, dat de frequenties der lijnen uitgedrukt kunnen worden door de volgende eenvoudige formule:

$$\text{frequentie} = \frac{3{,}3 \times 10^{15}}{2^2} - \frac{3{,}3 \times 10^{15}}{n^2}$$ [2])

Hieruit vindt men de frequenties der verschillende spectraallijnen, uitgedrukt in Hertz, wanneer voor n achtereenvolgens de waarden 3, 4, 5, enz. worden aangenomen. De correspondeerende golflengten kon men dan berekenen volgens de bekende methode: de lichtsnelheid te deelen door de frequenties. Hoe nauwkeurig de met deze formule berekende golflengten overeenstemmen met die, door meting gevonden, moge blijken uit onderstaande tabel, die in Ångströmsche eenheden de berekende en gemeten golflengten bevat voor de eerste acht leden der Balmerserie.

n	Golflengte waargenomen	Golflengte berekend
3	6562,80 Å	6562,88 Å
4	4861,38 -	4861,33 -
5	4340,51 -	4340,47 -
6	4101,78 -	4101,74 -
7	3970,11 -	3970,07 -
8	3889,09 -	3889,06 -
9	3835,43 -	3835,40 -
10	3797,93 -	3797,91 -

2) De nauwkeurige waarde der constante bedraagt $3{,}28758 \times 10^{15}$.

Dit was een hoogst merkwaardig resultaat, niet alleen op grond van de groote nauwkeurigheid, waarmede de oogenschijnlijk zinlooze formule op bijna tooverachtige wijze golflengten deed kennen, die men anders slechts door ingewikkelde metingen zou hebben kunnen vinden, maar vooral omdat de golflengten op mysterieuze wijze bleken samen te hangen met een reeks van geheele getallen. Het zou 28 jaar duren vóór men er in slaagde, dit mysterie der Balmerreeks te ontsluieren, doordat men inmiddels inzicht verworven had in het mechanisme van lichtuitzending door atomen.

Het bovenstaande was intusschen verre van de eenige regelmatigheid, die men in de spectra ontdekte. Reeds in 1889 toonde de Zweed Rydberg in een reeks geniale beschouwingen aan, dat ook in de spectra van tal van andere elementen series met overeenkomstige formule[3]) voorkwamen. Het merkwaardige daarbij was, dat deze formules alle dezelfde constante $3{,}3 \times 10^{15}$ bevatten, sindsdien constante van Rydberg genoemd.

Dit was een ontdekking van de allergrootste beteekenis, aangezien zij er op zou kunnen duiden, dat er een zekere regelmatigheid bestond in de structuur der atomen. Voorts is het van belang, er de aandacht op te vestigen, dat de frequentie der spectraallijnen, zoowel volgens Balmer als volgens Rydbergs formule, uitgedrukt wordt als een verschil tusschen twee grootheden, hetgeen, naar later bleek, een belangrijke physische oor-

---

3) De formule van Rydberg luidt:

$$\text{trillingsgetal} = \frac{3{,}3 \times 10^{15}}{(m + a)^2} - \frac{3{,}3 \times 10^{15}}{(n + b)^2},$$

waarin m en n geheele getallen, doch a en b breuken zijn, die verschillende waarden hebben voor de verschillende elementen, doch constant zijn voor een bepaalde serie.

zaak had. Deze twee bijzonderheden uit het gebied der spectroscopie zijn hier, naast talrijke andere, naar voren gebracht, omdat zij essentieel zijn voor de fundamenten, waarop de moderne atoomtheorie rust.

Nòg een belangrijke spectroscopische ontdekking, die veel heeft bijgedragen het inzicht in de lichtuitzending door atomen te verdiepen, dienen wij te vermelden, namelijk die, welke in 1896 gedaan werd door den Nederlander Zeeman over de beïnvloeding van spectraallijnen door een sterken magneet. Deze onderzoeker bracht daartoe het scherm tusschen de polen van een krachtigen electromagneet en nam daarna het spectrum waar in een zeer grooten spectroscoop. Hij constateerde toen, dat bepaalde lijnen gesplitst werden in drie andere, scherp gescheiden lijnen, welker afstand toenam, naar mate de magneet meer bekrachtigd werd. Figuur 11 op Plaat III geeft hiervan een beeld. Dit resultaat nam Lorentz, eveneens een Nederlander, onmiddellijk als uitgangspunt van een theoretische beschouwing, waarin hij op vrij eenvoudige wijze aantoonde, dat het door Zeeman gevonden effect móést optreden, wanneer men er van uitging, dat de lichtuitzending haar ontstaan te danken had aan trillingen van electronen in de atomen. Zulke trillende electronen zullen namelijk door de magnetische kracht op dezelfde wijze beïnvloed worden als de vrije electronen, die door de kathodestralen gevormd worden, en Lorentz' berekeningen toonden aan, dat deze beïnvloeding der atoomelectronen een zoodanige verandering hunner bewegingen zal meebrengen, dat zij, behalve het reeds bekende licht, ook lichtsoorten zullen uitzenden, zoowel met een iets grootere, als met een iets kleinere frequentie. Deze verandering in het trillingsgetal zal in-

tusschen, behalve van de sterkte van den magneet, ook afhangen van de electrische lading en de massa der trillende deeltjes, aangezien een groote lading natuurlijk sterker door den magneet beïnvloed zal worden dan een kleine, terwijl anderzijds op een zwaar deeltje de inwerking geringer is dan op een licht, hetgeen een lagere frequentie meebrengt. Met andere woorden: de verandering van het trillingsgetal en daarmede van de golflengte, onder invloed der magnetische kracht, zal afhangen van de verhouding tusschen de lading en de massa der trillende deeltjes, juist zooals dat het geval was bij de afbuiging der kathodestralen door magnetische en electrische krachten. Door de grootte van de splitsing de spectraallijnen te meten, benevens de sterkte van den magneet, kan men die verhouding tusschen lading en massa der trillende deeltjes berekenen. Tot groote triomph en vreugde, zoowel voor Zeeman en Lorentz als voor alle andere natuurkundigen ter wereld, bleken de berekeningen voor deze verhouding precies dezelfde waarde te geven als die, welke gevonden was bij de kathodestralen, zoodat daarmede als bewezen aangenomen mocht worden, dat het werkelijk trillingen der electronen in de atomen waren, die de uitzending van spectraallijnen veroorzaakten. De resultaten van deze onderzoekingen over de spectra der elementen namen evenwel langen tijd een geïsoleerde plaats in de physica in, en zij, die zich met de spectroscopie bezighielden, werden eenigszins als zonderlingen beschouwd, wier werk misschien wel heel interessant mocht zijn, maar toch niet heel veel belangrijker dan het oplossen van kruiswoordpuzzles. Eerst na verscheidene jaren bleek, welk een enorme waarde het materiaal, dat deze zonderlingen bijeengebracht hadden, bezat ter verstevi-

ging van den grond, die het trotsche bouwwerk der atoomtheorie zou dragen.

Röntgenstralen

In hetzelfde jaar, dat Zeeman en Lorentz hun belangrijke ontdekkingen deden, experimenteerde de Duitscher W. C. Röntgen met een kathodestraalbuis, evenals zoovele andere onderzoekers in twee werelddeelen. Maar het was Röntgen, die daarbij de ontdekking deed, dat er van de plaats van den glaswand, die door de kathodestralen getroffen werd, behalve het gewone licht, nog een geheel andere straling met hoogst merkwaardige eigenschappen uitging. Deze stralen, die thans Röntgens naam dragen, onderscheiden zich in het bijzonder daardoor, dat zij het vermogen bezitten, door verschillende ondoorzichtige stoffen heen te dringen, bijvoorbeeld het menschelijk lichaam. Toch drongen zij gemakkelijker door lichte dan door zware stoffen. De stralen zelf waren onzichtbaar, maar aangezien zij op een photographische plaat inwerkten, werd het mogelijk, schaduwbeelden te photographeeren van beenderen in het lichaam, doordat beenderen zwaardere stoffen bevatten dan de overige weefsels. Deze zuiver physische ontdekking werd spoedig in gebruik genomen door de medische wereld, die daardoor een prachtig middel in haar bezit kreeg, de plaats en de grootte van verschillende ziekten in het menschelijk lichaam te bepalen. De methodes tot het opwekken van Röntgenstralen bereikten daardoor snel een hoogeren graad van vervolmaking. De voornaamste verbeteringen bestonden daaruit, dat men de kathodestralen een zwaar metalen lichaam, de z.g. antikathode, in plaats van den glazen wand liet bombardeeren, en dat men een gloeienden

PLAAT IV

Fig. 15. Nevelkamerphoto van een kernbotsing, waarbij een α-deeltje botst met de kern van een waterstofatoom.

Fig. 16. Nevelkamerphoto van de botsing tusschen een α-deeltje en een heliumkern.

Fig. 11. Zeeman-effect. Boven: de normale spectraallijn; onder: haar splitsing onder invloed van een krachtigen magneet.

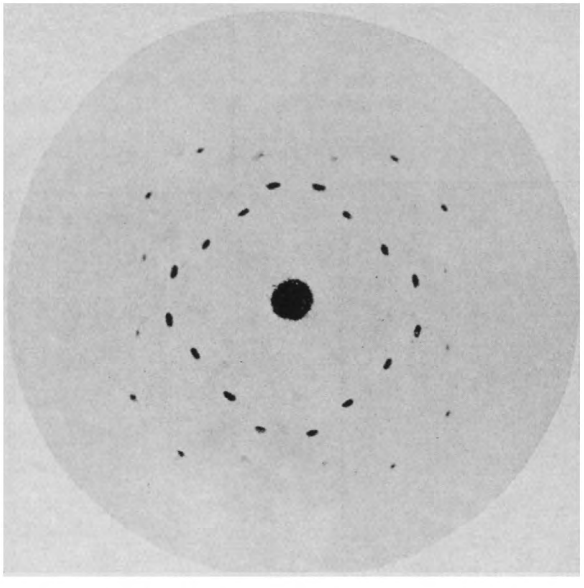


Fig. 13. Interferentie van Röntgenstralen bij doorgang door een kristal van zinkblende.

metaaldraad gebruikte voor het teweegbrengen der kathodestralen. Daarmede bereikte men, dat men Röntgenstralen van een groote sterkte en met groot doordringingsvermogen kon opwekken, hetgeen tevens tot een tweede toepassingsmogelijkheid in de medische wetenschap leidde: dergelijke krachtige (harde) stralen bleken een genezenden invloed uit te oefenen op kanker en andere gezwellen, zoodat Röntgenbestraling in vele gevallen een radiumbehandeling kon vervangen. Figuur 12 geeft een schets van een moderne Röntgenbuis.

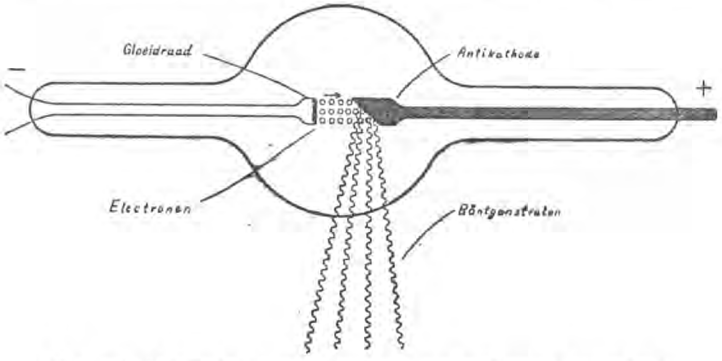


Fig. 12. Schematische teekening van een moderne Röntgenbuis

De Röntgenstralen werden reeds op groote schaal practisch toegepast, vóór men hun eigenlijken aard had leeren kennen, maar de natuurkundigen lieten zich niet onbetuigd. Röntgen zelf had reeds aangetoond, dat de stralen, anders dan de kathode- en de kanaalstralen, niet afgebogen konden worden door electrische en magnetische krachten; de Röntgenstralen konden dus niet uit electrisch geladen deeltjes bestaan. Anderzijds toonden de stralen door hun doordringingsvermogen, door hun onzichtbaarheid en vooral door het feit, dat zij, niet

teruggekaatst door spiegels of gebroken in prisma's, zich zoo verschillend van lichtstralen gedroegen, dat men nauwelijks kon aannemen, met electromagnetische golven te doen te hebben. Toch waren er experimenten, die er op wezen, dat de stralen wèl van electromagnetischen aard waren, doch dat zij een zeer kleine golflengte bezaten, maar het afdoende bewijs door het aantoonen, dat zij interferentie vertoonden, ontbrak nog steeds. Zooals reeds eerder naar voren gebracht is, moet men bij de meting van golflengten door interferentieproeven er voor zorgen, dat een deel der stralen een omweg met bekende lengte aflegt, opdat dit met de overige stralen kan interfereeren. In het geval, dat de stralen een zeer kleine golflengte bezitten, dient men den omweg overeenkomstig klein te maken. Wanneer nu de Röntgenstralen met de gebruikelijke methodes geen interferentieverschijnselen vertoonden, kon zulks ook tot oorzaak hebben, dat de gebruikte afstanden te groot waren.

In 1912 kreeg de Duitscher M. von Laue de geniale gedachte, in de natuur voorkomende kristallen als spiegels voor de Röntgenstralen te gebruiken. Algemeen werd namelijk op grond van de splijtbaarheid der kristallen in bepaalde richtingen aangenomen, dat de atomen gerangschikt zijn in regelmatige vlakken met geringen onderlingen afstand. Op deze veronderstelling baseerde von Laue zijn experiment, in de hoop, dat bij de gedeeltelijke terugkaatsing der Röntgenstralen tegen deze zoo kort bij elkaar liggende vlakken, een onderling afstandsverschil zou ontstaan, klein genoeg, om interferentieverschijnselen te voorschijn te roepen, ook bij minimale golflengten. De gedachte werd onmiddellijk aan de practijk getoetst in een experiment, waarbij men

een photographische plaat nauwkeurig aansluitend aanbracht tegen een kristal, en dat aan een scherp begrensden bundel Röntgenstralen blootstelde. De plaat toonde inderdaad, zooals men gehoopt had, behalve een groote zwarte vlek ter plaatse, waar zij door de direct doorgaande stralen getroffen was, een groot aantal zwarte vlekken, symmetrisch gerangschikt om de centrale verkleuring, overeenkomstig de wijze, waarop de stralen bij interferentie elkaar versterkt hadden. Figuur 13 van Plaat III toont zulk een opname, die het directe bewijs levert voor de golfnatuur der Röntgenstralen.

Waar de verdeeling der interferentievlekken slechts afhankelijk kan zijn van de golflengte der stralen en van de groepeering der atomen in het kristal, zou men uit den onderlingen afstand der vlekken de golflengte kunnen berekenen, indien men voor het gebruikte kristal den onderlingen afstand der vlakken kende, volgens welke de atomen gerangschikt zijn. Van de wijze, waarop men laatstgenoemden afstand kan berekenen, geeft onderstaande redeneering een beeld. Aangezien men het absolute gewicht der verschillende atomen kent, bijv. door bepaling volgens de kanaalstraalmethode, is het gemakkelijk uit te rekenen, hoevele atomen er voorkomen in een kristal van bekende samenstelling en bekend gewicht. Veronderstellende, dat alle atomen gelijkmatig verdeeld zijn over het geheele kristal, kan men ook hun onderlingen afstand berekenen. Voor een kristal van steenzout geeft zulk een berekening een afstand van atoomvlakken van 2,8 Å; wanneer deze afstand eenmaal bekend is, is het gemakkelijk, de golflengte der Röntgenstralen te berekenen op grond van interferentieproeven, met zulk een kristal ondernomen.

De golflengten, die men met deze methode gevonden

heeft, liggen tusschen $^1/_{10}$ Å en enkele geheele Å's; zij zijn dus vele duizenden malen kleiner dan de golflengten van het licht. Door von Laue's experiment werden geheel nieuwe gebieden van physische onderzoekingen geopend: eenerzijds ontwikkelde zich een afzonderlijke Röntgenspectroscopie, anderzijds begon men een studie te maken van de structuur der kristallen door het gebruik van Röntgenstralen met bekende golflengte. Beide gebieden hebben thans een hoogen graad van ontwikkeling bereikt; waar echter het laatstgenoemde hoofdzakelijk voor de mineralogen van belang is, zullen wij ons tot de eigenlijke Röntgenspectroscopie bepalen.

Een nauwkeurig onderzoek van de straling, die een Röntgenbuis uitzendt, leerde spoedig, dat men onderscheid moet maken tusschen twee soorten stralen. Eén daarvan onderscheidt zich, doordat zij een spectrum bezit, dat tusschen bepaalde grenzen alle golflengten bevat, en daarom het continue Röntgenspectrum genoemd wordt. Deze stralen worden niet beïnvloed door den aard van het metaal, waaruit de antikathode bestaat, en zijn slechts afhankelijk van de spanning, waarop men de Röntgenbuis laat functionneeren. Deze continue Röntgenstraling noemt men ook wel remstraling, omdat zij vermoedelijk ontstaat door plotselinge remming der electronen tegen de antikathode.

De electrische en magnetische grondwetten eischen namelijk, dat er steeds een electromagnetische straling ontstaat, wanneer deeltjes van snelheid veranderen, en de golflengte wordt kleiner, naarmate de snelheidsverandering sneller verloopt. De uitzending van golven door een antenne of door trillende electronen in een atoom berust ten slotte juist ook op snelheidsveranderingen der trillende ladingen.

Bovendien echter bleek uit Röntgenspectroscopische onderzoekingen, dat er ook een geheel andere soort Röntgenstralen uitgezonden wordt, die slechts enkele scherp begrensde golflengten omvat. Deze straling blijkt in hooge mate afhankelijk te zijn van den aard van het materiaal, waaruit de antikathode bestaat, zoodat zij uitgezonden moet worden door de elementen, die daarin voorkomen. Ieder element geeft zoodoende zijn eigen karakteristieke Röntgenspectrum, bestaande uit slechts weinige spectraallijnen. Deze karakteristieke Röntgenspectra vormen, evenals de gewone optische spectra der elementen, den grondslag voor een practisch bruikbare spectraalanalyse, aangezien de Röntgenspectra op grond hunner groote eenvoudigheid in vele gevallen de voorkeur verdienen boven de gewone, ook al eischt de Röntgenspectraalanalyse een meer omvangrijke apparatuur. Ook langs dezen weg heeft men nieuwe elementen ontdekt, bijvoorbeeld rhenium en hafnium.

Terwijl de atoomtheoretische verklaring der optische spectra en hun wetten vele jaren op zich liet wachten, volgde de verklaring van de wetten der Röntgenspectra onmiddellijk bij de opstelling der atoomtheorie, waarvoor zij dadelijk als fundament kon dienen. Daarom zullen wij een nadere beschouwing dezer wetten en haar beteekenis voor het inzicht in den bouw der atomen, uitstellen, totdat zulks kan geschieden in verband met de atoomtheorie.

Photo-electronen en stralingsquanten

Wanneer men in den bioscoop zit, vol bewondering voor de natuurlijkheid, waarmede de film de menschelijke stem of de tonen der muziek kan weergeven, denkt

men er nauwelijks aan, dat deze treffende resultaten te danken zijn aan atomen, die op de maat met de op de film vastgelegde geluidstrillingen, stroomen electronen afgeven, welke, na duizenden malen versterkt te zijn, de luidsprekers in werking brengen. Men bereikt dit, door een lichtstraal te laten vallen door de film, waarop met speciale methodes zwarte strepen van wisselende lengte en intensiteit zijn aangebracht, die het oorspronkelijke geluid weergeven. De lichtstraal, die, na de film gepasseerd te zijn, in sterkte varieert overeenkomstig die strepen, laat men nu vallen op een z.g. photocel, waarin hij uit de atomen van een dunne plaat metaal zooveel electronen vrijmaakt, als met zijn sterkte overeenstemt. Het op deze wijze bevrijden van electronen, in de physica reeds langen tijd bekend, wordt photo-electrisch effect genoemd, en is slechts een ionisatie van atomen, die door licht tot stand gebracht wordt. De losgerukte electronen worden dikwijls photo-electronen genoemd, maar zijn in werkelijkheid heel gewone electronen. Nauwkeurige onderzoekingen van het photo-electrisch effect, die voornamelijk door den Duitscher Lenard werden verricht, toonden intusschen aan, dat er talrijke regels bestonden, die verrassende bijzonderheden over het stralingsmechanisme aan den dag brachten.

Op het eerste gezicht schijnt het op zichzelf niet zóó merkwaardig, dat een atoom electronen kan verliezen, door bestraling met licht, aangezien de verschillende vormen van ioniseering geleerd hebben, dat electronen niet bijzonder vast in de atomen zitten. Daarentegen komt men tot hoogst merkwaardige ervaringen, wanneer men de belichting uitvoert met licht van verschillende kleuren, en de snelheid meet, waarmede de electronen door het metaaloppervlak uitgezonden worden.

Belicht men bijvoorbeeld een natriumoppervlak met groen licht, en meet men de snelheid der photo-electronen, dan vindt men, dat deze uitgezonden worden met alle snelheden tot een bepaald maximum, dat gelijk blijft, onverschillig of de lichtsterkte groot is of niet, hetgeen op zichzelf reeds genoeg is om tot nadenken te stemmen. Zelfs met het zwakste groene licht zal de grootste snelheid der electronen gelijk zijn aan die, welke bij een zeer intensieve bestraling gemeten wordt; slechts het aantal uitgezonden electronen zal bij het zwakke licht geringer zijn. Het lijkt wel of de natuur een maximum snelheid ingevoerd heeft voor electronen, die een metaal verlaten, op dezelfde wijze als menschelijke wetten in sommige landen de snelheid der motorrijtuigen door een bepaald maximum begrenzen.

Maar nog grooter verrassing bereiden ons de photo-electronen, wanneer wij, in plaats van het groene licht, tot het gebruik van andere kleuren overgaan. Bij blauw licht blijkt de maximum snelheid aanzienlijk grooter te zijn geworden, maar nog steeds onafhankelijk van de belichtingsintensiteit. Gaan wij in dezelfde richting verder in het spectrum, d.w.z. laten wij violet of ultra-violet licht op het natriumoppervlak vallen, dan krijgen de losgerukte electronen een steeds grootere snelheid met behoud der maxima voor de verschillende kleuren, zoodat blijkt, dat licht krachtiger op de electronen inwerkt naarmate het een grootere frequentie bezit. Dit blijkt nog duidelijker, wanneer men proeven neemt met licht van lagere frequentie; bij het gebruik van rood licht worden zelfs in het geheel geen photo-electronen vrijgemaakt. Hoe sterk men het roode licht ook maakt, de photocel wordt er niet door beïnvloed. Door nu te experimenteeren met lichtsoorten tusschen rood en

groen, kan men een kleur vinden, waarvan de frequentie juist voldoende is om een photo-electrisch effect teweeg te brengen. Uit deze proeven kan men concludeeren, dat lichtsoorten van verschillende golflengten, behalve de kleur, nog een ander hoedanigheidsverschil hebben, dat daaruit bestaat, dat licht meer energie aan de afzonderlijke electronen kan afstaan, naarmate zijn frequentie hooger is. De snelheden, die photo-electronen in het algemeen bereiken, zijn zeer gering in vergelijking met die, welke bijv. voor de β-stralen gevonden zijn. Bij bestraling met een lichtsoort, die nog juist in staat is, electronen te bevrijden, zal de snelheid daarom practisch nihil zijn. Om de snelheid van zulke langzame electronen te meten maakt men gebruik van speciale methodes, die er in laatste instantie op neer komen, dat men de bewegingsenergie der electronen bepaalt. De beginselen der natuurkunde leerden ons immers reeds, dat de bewegingsenergie van een lichaam grooter is, naarmate het een grootere massa en een grootere snelheid bezit. Heeft men twee lichamen met dezelfde snelheid, waarvan echter het eene twee maal zoo zwaar is als het andere, dan zal het zwaarste over de dubbele hoeveelheid bewegingsenergie beschikken. Heeft men evenwel twee even zware lichamen, waarvan het eene een twee maal zoo groote snelheid bezit als het andere, dan is de bewegingsenergie van het snelste vier maal zoo groot als die van het langzaamste. Wanneer men de snelheid van een auto verhoogt van 50 kilometer per uur tot 100 kilometer, krijgt het voertuig dus ook een 4 maal zoo groote bewegingsenergie [4]).

4) Deze verhouding wordt in de mechanica uitgedrukt door de vergelijking $E = {}^1/_2 m v^2$, waarin E de bewegingsenergie, m de massa van het lichaam en v de snelheid daarvan voorstelt.

Laat men den wagen op het moment, dat hij laatstgenoemde snelheid bereikt heeft, met ontkoppelden motor een gelijkmatige helling oploopen, dan komt hij „op zijn vaart" dan ook vier maal zoo hoog als met 50 kilometer het geval zou zijn. De afstand, dien een auto op deze wijze kan afleggen tegen een gelijkmatige helling op, is een directe maat voor de bewegingsenergie, die hij aan den voet der helling bezat.

In plaats van de snelheid der photo-electronen te

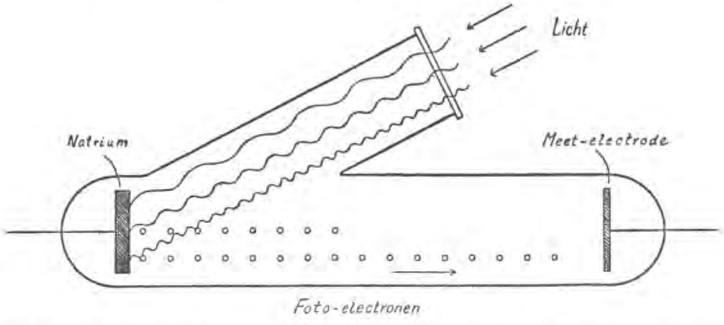


Fig. 14. Schematische voorstelling van het photo-electrisch effect. Geteekend zijn drie lichtstralen met verschillende golflengten; de straal met de grootste golven kan geen electronen bevrijden, terwijl de andere electronen bevrijden met een snelheid die grooter is, naarmate de golflengte kleiner is.

meten, kan men dus volstaan met het bepalen dezer bewegingsenergie. Ten einde deze te leeren kennen, brengt men in de luchtledige glazen buis, waarin de belichting der metalen plaat uitgevoerd wordt, een extra electrode aan, overeenkomstig de wijze, aangegeven in figuur 14. Verbindt men deze meetelectrode met een gevoeligen galvanometer, dan kan men de sterkte bepalen van den stroom, die door de photo-electrische cel gevormd wordt. Geeft men echter de electrode een negatieve spanning, dan zal zij electronen

uitzenden, waardoor de stroom vermindert. Men kan nu de spanning bepalen, die juist voldoende is om alle electronen te remmen; er gaat dan geen stroom door. Deze spanning is een directe maat voor de bewegingsenergie der snelste electronen; men pleegt daarom de bewegingsenergie der electronen uit te drukken door de electrische spanning, die juist in staat is, ze tegen te houden. Men zegt bijv., dat zij een bewegingsenergie bezitten van 10 electron-Volt, of kortweg 10 Volt, wanneer een tegenspanning van tenminste 10 Volt noodig is, hun uitzending te verhinderen. Omgekeerd kunnen rustende electronen in beweging worden gebracht door de aantrekkende of afstootende kracht van electrisch geladen lichamen. Wordt een electron door middel van een spanning van 10 Volt van een plaat af weggestooten, dan is zijn energie eveneens 10 electron-Volt.

Nadat wij nu vastgesteld hebben, hoe en in welke eenheden men de energie der photo-electronen meet, keeren wij terug naar ons eigenlijke onderwerp. Nauwkeurige metingen van de maximale energie der photo-electronen bij belichting met lichtsoorten van verschillende frequentie gaven als resultaat, dat een toename van het trillingsgetal een daaraan evenredige toename dier maximum-energie meebracht. Bovendien bleek, dat de verhouding tusschen toename van energie en stijging van het trillingsgetal voor alle materialen precies dezelfde was, namelijk $4{,}1 \times 10^{-15}$, welke waarde tevens de vergrooting der energie, uitgedrukt in electron-Volt, aangeeft, die de photo-electronen ontvangen, wanneer de frequentie van het gebruikte licht met 1 wordt vermeerderd.

Dit verschijnsel leidde nu tot de ontdekking van een geheel nieuwe eigenschap van het licht. Einstein toonde

n.l. in 1905 aan, dat men, om deze regelmatigheden te begrijpen, moest aannemen, dat lichtenergie aan de electronen slechts toegevoerd kan worden in zeer bepaalde hoeveelheden of quanten, waarvan de grootte gelijk is aan het product der experimenteel gevonden constante en de frequentie van het licht. Men krijgt dus de vergelijking:

$$\text{lichtquant} = 4{,}1 \times 10^{-15} \times \text{frequentie},$$

welke in al haar eenvoudigheid de kennis bevat van de nieuw ontdekte zijde der gesteldheid van het licht, die aan den dag treedt, wanneer licht en stof op elkaar inwerken.

Het mechanisme van het photo-electrisch effect is dus, dat er voor de bevrijding van ieder electron uit een atoom een lichtquant noodig is van de genoemde grootte. Dit maakt het duidelijk, dat licht met een hooge frequentie aan de electronen een groote energie mededeelt. Evenwel ontvingen de electronen niet de geheele energie, waarover de lichtquant beschikte: een deel daarvan is noodig voor het losrukken zelf, hetgeen ook verklaart, dat de electronen het metaal niet kunnen verlaten, wanneer de gebruikte lichtquanten te gering zijn, d.w.z. de frequentie te klein is. De ervaring, dat lichtenergie slechts omgezet kan worden in energiequanten met een zeer bepaalde grootte, beteekende een wetenschappelijke revolutie: zij hield in een volkomen breuk met de voorstellingen, die men zich vroeger omtrent den aard van het licht gevormd had. Hierbij moet intusschen opgemerkt worden, dat de Duitscher Planck reeds in het jaar 1900 het begrip energie-quant ingevoerd had ter verklaring van bepaalde verschijnselen uit de warmtestraling, die anders onbegrijpelijk zouden

blijven. Zelfs kon hij het getal $4{,}1 \times 10^{-15}$ als waarde aangeven der constante, die, zooals wij gezien hebben, de grootte van de quant bepaalt en daarom den naam Plancksche constante heeft ontvangen. Maar eerst het photo-electrisch effect en de verklaring, die Einstein daarvan gaf, leverden ons een overtuigend en eenvoudig bewijs voor de juistheid van de theorie der lichtquanten. Dat men deze gesteldheid van het licht niet reeds veel eerder had waargenomen, heeft als oorzaak, dat de lichtquanten buitengewoon klein zijn, en dat zij bij de gebruikelijke lichtsterkten in enorm grooten getale optreden. Berekent men bijv. hoeveel lichtquanten uitgestraald worden door een gewone electrische gloeilamp, dan komt men tot een waarde van circa 10^{20} per seconde, zoodat het geen wonder is, dat het menschelijk oog niets van de discontinuïteit bemerkt, evenmin als men aan een waterdruppel kan zien, dat hij uit atomen bestaat.

Wij hebben thans gezien, hoe de atomistische opvattingen geleidelijk op alle gebieden der physica zijn binnengedrongen. Eerst was het de materie zelf, die opgebouwd bleek uit atomen, daarna kwam de beurt aan de electriciteit met de ontdekking der electronen en ten slotte is gebleken, dat ook de omzetting van electromagnetische stralingsenergie niet continu verloopt, maar in quanten geschiedt.

De ontdekking der atoomkernen

Hoewel de tot nu toe beschreven physische ontdekkingen aanzienlijk bijgedragen hebben tot een inzicht in den bouw der atomen, geschiedden zij toch alle min of meer toevallig. Thans echter komen wij tot de eerste experimenten, die speciaal ondernomen werden met het

doel, het atoomprobleem tot oplossing te brengen. Door vroegere proefnemingen was toen reeds bekend, dat atomen electronen, benevens positief geladen deeltjes bevatten, en bezat men nauwkeurige methodes ter bepaling van het gewicht, de grootte en het aantal der atomen.

Ten einde nu nader inzicht te verkrijgen in de wijze, waarop de electronen en de positieve ladingen verdeeld zijn over de kleine ruimte, die een atoom inneemt, zou men zich kunnen voorstellen, dat men een soort ontdekkingsreiziger zond naar het onbekende land der atomen, om hem na zijn terugkeer uit te hooren. Rutherford gebruikte in 1911 de door de radio-actieve stoffen uitgezonden α-stralen tot dit doel, aangezien op grond van hun positieve lading te verwachten was, dat de α-deeltjes op hun weg door een atoom beïnvloed zouden worden op een wijze, die afhangt van de verdeeling der lading in het atoom. Ten einde dus te onderzoeken, op welke wijze de α-deeltjes afgebogen zouden worden van hun rechtlijnige baan, liet Rutherford een smallen bundel α-deeltjes een blaadje goud of platina bombardeeren, zóó geweldig dun, dat de deeltjes er doorheen konden dringen. Op een zinksulphidescherm, op korten afstand van het goudblad aangebracht, bestudeerde hij met een microscoop de groen oplichtende plaatsen, die de α-deeltjes na het doordringen van het bladmetaal veroorzaakten. Hij constateerde nu, dat, terwijl de meeste partikels hun weg rechtlijnig vervolgden, een klein deel afgebogen werd, niet zelden zelfs in sterke mate. In zeldzame gevallen nam hij zelfs afbuigingshoeken tot 180° waar, hetgeen zeggen wil, dat het α-deeltje teruggekaatst werd langs ongeveer denzelfden weg, dien het gekomen was. Zulke groote

afbuigingen zouden volkomen onverklaarbaar zijn indien men aanneemt, dat de positieve ladingen en de electronen regelmatig over het geheele atoom verdeeld waren, tot welke opvatting men tot dien tijd geneigd was.

De spreiding kon men daarentegen verklaren, zooals Rutherford bewees, door aan te nemen, dat de positieve lading en het geheele gewicht van het atoom, op dat der lichte electronen na, geconcentreerd waren in een zeer klein gebied, hetwelk hij de atoomkern noemde, en dat de electronen om de kern draaiden op een afstand, die overeenkomt met de grootste afmeting van het atoom. Op die manier ware begrijpelijk, dat de zware α-deeltjes in den regel vrijwel ongehinderd den electronenzwerm kunnen passeeren. Slechts wanneer zij op zeer korten afstand van de atoomkern kwamen, zou de afstootende werking daarvan zulke afmetingen aannemen, dat de α-deeltjes in aanzienlijke mate uit hun baan gebracht werden. Ter illustratie van Rutherfords proef en de door hem gegeven verklaring, willen wij ons voorstellen, dat wij met een jachtgeweer doelschieten op een schutting. In verreweg de meeste gevallen zullen de hagelkorrels in de schutting dringen, maar een enkelen keer kan het voorkomen, dat een der kogeltjes teruggeslingerd wordt tot voorbij de plaats van den schutter. Na zulk een ervaring zal men stellig de schutting gaan onderzoeken, ten einde vast te stellen, wat de oorzaak van het terugspringen van het hagelkorreltje geweest is, en als zoodanig zal men zeker een knoest of een andere harde plaats in het hout ontdekken. Dat zulks echter slechts zelden gebeurt, berust op de omstandigheid, dat het totale oppervlak, door knoesten ingenomen, slechts klein is in verhouding tot het oppervlak

der schutting. Even eenvoudig in beginsel en even logisch in zijn verklaring was Rutherfords experiment, al kon hij de „knoesten" in de atomen niet direct waarnemen, maar hij moest tot hun aanwezigheid concludeeren uit het verloop van het beschietingsproces zelf.

Doch Rutherford kon uit zijn proefnemingen nog andere, scherp omlijnde conclusies trekken. Uit de veelvuldigheid, waarmede de groote afbuigingen zich voordeden, kon hij zich niet slechts een beeld vormen van de afmetingen der atoomkernen, maar eveneens van de grootte der positieve lading, aangezien een groote lading natuurlijk gemakkelijker een sterke afbuiging zal veroorzaken dan een kleine lading. Door een nauwkeurig onderzoek van de verdeeling der in de verschillende richtingen uit hun baan geslingerde α-deeltjes, ondersteund door scherpzinnige wiskundige berekeningen, slaagde hij er in, de grootte en de lading der atoomkernen bij benadering te bepalen. Voor den diameter van een atoomkern vond men een waarde, die voor alle elementen ongeveer 10^{-12} cm bedraagt en die dus 10.000 maal kleiner is dan de buitenmaat van het atoom, die, zooals wij gezien hebben, op ca. 10^{-8} cm berekend wordt. Stellen wij ons voor, dat een atoom zooveel vergroot wordt, dat de kern de afmetingen krijgt van een sinaasappel, dan zal het geheele atoom dus bijna $^1/_2$ kilometer in diameter worden. Het overgroote deel van een atoom bestaat dus in werkelijkheid uit ledige ruimte, zoodat men zich kan voorstellen, dat een α-deeltje vele atomen doorkruisen kan, zonder een kern te treffen.

Eenige jaren na Rutherfords proef werd het voor iedereen mogelijk gemaakt, zich persoonlijk te overtuigen van het feit, dat de waarnemingen van dezen

Engelschen onderzoeker juist waren, namelijk toen het aan zijn landgenoot Blacket gelukte, de banen te photographeeren van α-deeltjes, die afgebogen werden, doordat zij botsten met kernen van atomen uit de lucht in een condensatiekamer. Figuur 15, Plaat IV geeft zulk een opname van den doorgang van α-deeltjes door gewone lucht weer; men ziet een afzonderlijk α-deeltje botsen met een zuurstofkern, waardoor dit deeltje zelf scherp naar links afbuigt, terwijl de korte tak naar rechts afgeteekend is door het zuurstof-atoom, dat door de botsing in beweging is gebracht. Waar het zuurstof-atoom zwaarder is dan een α-deeltje, heeft het bij de botsing een minder groote snelheid verkregen, zoodat zijn baan korter is dan die van het α-deeltje. Figuur 16 van Plaat IV toont een zeer interessante botsing tusschen een α-deeltje en een heliumkern, die bewerkstelligd werd door een condensatiekamer met helium te vullen. Men ziet, dat de twee takken van de baan loodrecht op elkaar staan, hetgeen daarop berust, dat een α-deeltje en een heliumkern precies even zwaar zijn. De billardspelers onder onze lezers zullen met dit verschijnsel bekend zijn, aangezien twee even zware billardballen na een botsing eveneens verder gaan in twee loodrecht op elkaar staande richtingen. Op grond van de zeldzaamheid, waarmede een kernbotsing optreedt, moest Blacket vele duizenden condensatiekamer-opnamen maken, vóór het hem gelukte, zulk een gebeurtenis op de plaat vast te leggen.

De verklaring van zijn atoombeschietingsproeven bracht Rutherford tot een opvatting van een structuur der atomen, die het Rutherfordsche atoommodel genoemd wordt, en volgens welke de atomen der elementen alle op dezelfde wijze zouden zijn opgebouwd met

een zware positieve kern in het midden, en met electronen, die zich in gesloten kromme banen daaromheen bewegen, dus ongeveer als een miniatuur zonnestelsel met de kern als zon en de electronen als planeten. Het aantal electronen moet natuurlijk precies hetzelfde bedragen als het aantal positieve ladingen van de kern, indien het atoom als geheel electrisch neutraal wil zijn. Zooals reeds naar voren gebracht werd, kon Rutherford uit de spreidingsproeven een bij benadering juiste waarde vinden voor het aantal positieve elementair-ladingen in de kern; hij vond daarvoor een getal, dat iets kleiner was dan het halve relatieve atoomgewicht van het element, en dat grooter werd, naarmate dit atoomgewicht steeg. Voor goud bijv., met een atoomgewicht van 197, vond hij een kernlading van 79.

Rangschikt men de elementen volgens de stijging hunner atoomgewichten, dan ligt het voor de hand aan te nemen, dat deze reeks overeenstemt met de toename van de kernlading. Het lichtste atoom, dat van waterstof, moet verondersteld worden te bestaan uit één elementair-lading met één, zich daaromheen bewegend, electron. Het eerstvolgend zwaardere atoom, dat van helium, zou dan een kern bezitten met twee ladingen, met twee zich daaromheen bewegende electronen; het metaal lithium drie van ieder, enz. Volgens deze opvatting, die aanvankelijk slechts een zelfs eenigszins précaire hypothese was, zou het nummer in de elementenreeks, het atoomnummer, eenvoudig het aantal ladingen in de kern van het betreffende element aangeven, en daarmede ook het aantal der wervelende electronen. Hoewel de hypothese zich naderhand uitstekend bleek te leenen voor een verklaring van de chemische en physische eigenschappen der elementen, en zoodoende

de overtuiging veld won, dat de atomen (en daarmee alle materie) opgebouwd zijn uit positieve en negatieve deeltjes, had men aanvankelijk toch nog in het geheel geen zekerheid, welke natuurwetten de wisselwerking tusschen deze deeltjes beheerschten. Vooral de wetmatigheid van het lijnen-spectrum en het photo-electrisch effect waren geheel onbegrijpelijk, indien men uitging van de tot dien tijd geldige grondwetten der natuurkunde. Deze echter waren gevonden door experimenten met lichamen van zoodanig groote afmetingen en massa's, dat men niet zonder meer mocht aannemen, dat zij ook toepasselijk waren op de toestanden in afzonderlijke atomen.

In een reeks groote ontdekkingen, die den grondslag vormt voor de atoomphysica, zijn hier steeds de allerbelangrijkste genoemd. Een groot aantal bijzonderheden, die geenszins zonder beteekenis waren voor haar ontwikkeling, hebben wij stilzwijgend voorbij moeten gaan, zoodat het beeld, dat wij getracht hebben te geven van de atoomphysica, onmiddellijk vóór het voor haar sensationeele jaar 1913, geenszins tot in de détails juist mag heeten. Wij hebben echter hoop, dat het, ondanks de breede pennestreken, voldoende welgelijkend zal zijn.

II

HET MYSTERIE DER ATOOMSTRUCTUUR WORDT ONTHULD

De ontwikkeling der wetenschap vindt langs talrijke, zeer verschillende, wegen plaats. Veelal meent men, dat de vooruitgang gebaseerd is op de sensationeele ontdekkingen, maar niet vergeten mag worden, dat in de periode daartusschen, zeer belangrijk werk verricht wordt, bestaande uit het, door steeds nauwkeuriger metingen en berekeningen, aan de groote ontdekkingen verschaffen van haar fundament. Soms echter gebeurt het, dat de wetenschap met een sprong voorwaarts gaat, doordat er een onderzoeker opstaat, die in staat is, met geniale scherpzinnigheid het onderzoekings- en ontdekkings-materiaal van een geheel tijdvak in een groot verband onder te brengen. Zulk een samenvatting zal in den regel in hooge mate bevruchtend op de wetenschap werken, doordat men in staat gesteld wordt, nieuwe onderzoekingen, die anders vaak een zoeken in den blinde beteekenen, meer systematisch te verrichten. Bovendien opent het aldus gevormde overzicht in den regel geheel nieuwe onderzoekingsgebieden.

Bohrs atoomtheorie

Zulk een sprong in de ontwikkeling der atoomphysica vond in 1913 plaats, toen de Deen Niels Bohr

zijn atoomtheorie opstelde. Deze onderzoeker gebruikte als uitgangspunt Rutherfords atoommodel, dat hij op geniale wijze in verband bracht met de door Planck en Einstein opgedane merkwaardige ervaring, dat bij bepaalde verschijnselen stralingsenergie door de stof uitgezonden of opgenomen wordt in vaste energiequanten. Rutherfords atoommodel op zichzelf bleek namelijk spoedig in tegenspraak te komen met de tot dien tijd algemeen geldig geachte wetten, hetgeen gemakkelijk is in te zien, indien men nagaat, hoe bijvoorbeeld een waterstofatoom, opgebouwd overeenkomstig Rutherfords model, dus bestaande uit een (positieve) elementairlading, waarom een electron zich beweegt als een planeet om de zon, zich volgens deze wetten zou gedragen. Aangezien de wetten, die voor de electrische aantrekking tusschen kern en electronen gelden, precies dezelfde zijn als Newtons algemeene aantrekkingswetten, die de beweging der planeten om de zon beheerschen, zou de baan van het electron om de kern een ellips moeten zijn met die kern in een der brandpunten, dan wel een cirkel met de kern in het middelpunt. Tusschen atoom en zonnestelsel bestaat echter dit groote verschil, dat een electron electrisch geladen is, hetgeen medebrengt, dat het voortdurend electromagnetische golven zal uitstralen, aangezien iedere electrische lading, welker snelheid in richting of grootte veranderingen ondergaat, zulke golven uitstraalt. Deze straling zou echter regelmatig energie aan het atoom onttrekken, met als gevolg, dat het electron in steeds kleiner banen om de kern komt te loopen, tot het daar eindelijk mede samenvalt. Zulk een atoommodel zou de grootste energie hebben, wanneer het electron het verst verwijderd is van de kern, en de

kleinste, wanneer het kort om de kern beweegt, aangezien het meer energie eischt, een electron van het atoom los te rukken, naar mate het zich korter bij de kern bevindt. Met het naderen tot de kern zal echter ook de snelheid grooter worden en daarmede de frequentie der uitgezonden straling ook steeds hooger. Met andere woorden, volgens de gewone physische wetten zou zulk een atoomsysteem in zeer korten tijd zijn geheelen voorraad energie afgeven in den vorm van electromagnetische golven met regelmatig afnemende golflengte, hetgeen in volkomen tegenspraak is met de ervaring, dat de atomen lichtsoorten uitzenden met scherp begrensde golflengten.

Een nog ernstiger bedenking ten slotte is, dat zulk een atoomsysteem niet stabiel zou zijn, doch in een oogenblik zou samenschrompelen tot een deeltje van de grootte van een atoomkern, hetgeen ten eenen male wedersproken wordt door de ervaring, dat de atomen een opvallend stabielen bouw bezitten, en een ruimte innemen, die ongeveer 10.000 keer zoo groot is als de kern. Het zag er dus donker uit voor Rutherfords atoommodel, vóór Bohr de gedurfde conclusie trok, dat de fout niet aan het atoommodel lag, doch aan de gangbare electrische, magnetische en mechanische grondwetten, die ons in den steek laten, wanneer zij op afzonderlijke atomen toegepast worden. Hóé moedig deze gevolgtrekking was, zal men begrijpen, wanneer men zich in herinnering brengt, dat op deze wetten de geheele z.g.n. klassieke physica berust, die niet slechts de ervaringen en ontdekkingen van eeuwen samenvat, doch ook den grondslag vormt voor de geheele moderne techniek, in het bijzonder de zoo hoog ontwikkelde electrotechniek. Het inzicht, dat men de wetten der

klassieke physica niet zonder meer kan toepassen op de wereld der atomen, doch dat in het inwendige daarvan geheel andere wetten gelden, waarop de stabiliteit der atomen berust, werd door Bohr op volledige wijze tot uiting gebracht in het eerste der twee beroemde postulaten, waarop hij zijn atoomtheorie grondvest. Dit eerste postulaat houdt in, dat een atoom slechts kan bestaan in zeer bepaalde toestanden (z.g. stationnaire of discrete toestanden), waarin het ook zeer bepaalde energiewaarden bezit, terwijl het atoom geen straling uitzendt, zoolang het zich in deze toestanden bevindt. Uitzending of opname van stralingsenergie kan slechts plaats vinden, wanneer het atoom van den eenen stationnairen toestand in den anderen overgaat. In dit postulaat wordt dus uitdrukkelijk gezegd, dat trillende electronen in den stationnairen toestand van een atoom geen straling uitzenden, zooals volgens de regels der klassieke physica het geval zou moeten zijn. De ontkenning van deze noodzakelijkheid maakt het den atomen mogelijk, hun stabiliteit te bewaren; daartegenover houdt de omloopsnelheid der electronen in de stationnaire toestanden dan geen verband meer met de straling, die het atoom eventueel uitzendt. Voorts nam Bohr aan, dat de uitzending van stralen geschiedt in energiequanten, gelijk door Planck geconstateerd was bij warmtestraling, hetgeen hij formuleerde in zijn tweede postulaat: de straling, die door een atoom uitgezonden of opgenomen wordt bij den overgang van den eenen stationnairen toestand in den anderen, heeft een trillingsgetal, dat daardoor bepaald wordt, dat het product van de Plancksche constante en het trillingsgetal gelijk is aan het verschil der hoeveelheden energie, waarover het atoom in de betreffende stationnaire toestanden beschikt.

Waar, zooals men zich herinneren zal, het product van de Plancksche constante en het trillingsgetal één energiequant bedraagt, kan men den inhoud van het tweede postulaat ook uitdrukken door te zeggen, dat er een energiequant uitgezonden wordt, iederen keer, dat een atoom van een toestand met hoogeren energie-inhoud terug valt in een met lageren. Wanneer deze twee toestanden een groot energieverschil bezitten, zal de uitgezonden quant en daarmede ook het trillingsgetal, groot zijn, zoodat men licht krijgt met een korte golflengte, terwijl een klein energieverschil licht zal veroorzaken met een groote golflengte. Omgekeerd kan men, door een atoom te bestralen met licht van een geeigende golflengte, bewerkstelligen, dat het atoom een energiequant opneemt, waarbij het van een stationnairen toestand overgaat in een anderen met overeenkomstig grootere energie.

Dit postulaat brengt ook de golflengte der uitgezonden straling in direct verband met de energietoestanden van het atoom, zoodat wij kunnen verwachten, dat de spectra ons iets naders over de energie der atomen in de stationnaire toestanden zullen kunnen leeren. Zooals gebleken is uit de onderzoekingen van Rydberg en Balmer over de regelmatigheden der lijnenspectra, treedt het trillingsgetal altijd op als een verschil tusschen twee grootheden, hetgeen voor dien onverklaarbaar geweest was. Ingevolge het tweede postulaat van Bohr geven deze grootheden, indien men ze vermenigvuldigt met de Plancksche constante, eenvoudig de energie-inhouden aan, die een atoom in de onderscheidene stationnaire toestanden bezit. Dit geldt voor alle atomen, hetgeen ons in staat stelt, met behulp van spectroscopische metingen alle energietoestanden der ato-

men te berekenen. Uit de formule van Balmer (zie pag. 44) vinden wij voor het waterstofatoom bijv., dat de achtereenvolgende energiewaarden, uitgedrukt in electron-Volt, bedragen

$$\frac{3{,}3 \times 10^{-15}}{n^2} \times 4{,}1 \times 10^{-15} = \frac{13{,}5}{n^2},$$

wanneer men n de reeks der eenvoudige geheele getallen laat doorloopen. Daar het waterstofatoom uit een kern en één electron bestaat, zijn deze verschillende hoeveelheden energie slechts een uitdrukking voor den arbeid, die verricht moet worden, om het electron van den betreffenden toestand geheel uit het atoom te verwijderen. Voor de verschillende stationnaire toestanden van het waterstofatoom vindt men voor dien arbeid de volgende reeks waarden:

$$\frac{13{,}5}{1}, \frac{13{,}5}{4}, \frac{13{,}5}{9}, \frac{13{,}5}{16}, \frac{13{,}5}{25}, \text{ enz.}$$

Lijnen in de Balmerserie worden vooral uitgezonden, wanneer het atoom van hoogere stationnaire toestanden met n = 3, 4, 5, 6, enz. terug valt in den stationnairen toestand met n = 2, die, als arbeid om de vrijmaking van het electron te bewerkstelligen, $\frac{13{,}5}{2^2}$ behoeft, terwijl de frequenties der uitgezonden lijnen gevonden worden door de verschillen:

$$\frac{13{,}5}{4} - \frac{13{,}5}{9}; \frac{13{,}5}{4} - \frac{13{,}5}{16}; \frac{13{,}5}{4} - \frac{13{,}5}{25}, \text{ enz.}$$

te deelen door de Plancksche constante $4{,}1 < 10^{-15}$, welke berekening inderdaad trillingsgetallen der Balmerserie opleveren.

Trachten wij intusschen, de stationnaire toestanden aan een nauwkeurige theoretische beschouwing te onderwerpen, dan bevinden wij ons in de merkwaardige situatie, dat wij oogenschijnlijk in het geheel niets kunnen berekenen, daar wij geen uitgangspunt hebben. Door het erkennen der postulaten hebben wij alle sche-

pen achter ons verbrand, doordat wij den vasten grondslag, dien de klassieke mechanica ons bood, verlaten hebben. Om uit deze impasse te geraken, zullen wij een daad verrichten, die er op het eerste gezicht uitziet als de grootste inconsequentie. Wij zullen namelijk doen, alsof de wetten der gewone mechanica haar geldigheid hadden behouden ten opzichte van een waterstofatoom, en langs dien weg trachten de electronenbanen te berekenen, welke juist de hoeveelheden energie bezitten, die overeenkomen met de verschillende stationnaire toestanden van het waterstofatoom. Zulk een berekening is al zeer eenvoudig: men kent lading en massa, zoowel van het electron als van de kern. Men vindt dan, dat het electron, om een energie van 13,5 electron-Volt te bezitten, zich in een cirkelvormige baan met een diameter van 10^{-8} cm moet bewegen, hetgeen dus zeer goed overeenstemt met de grootte van een atoom, zooals die door zuiver experimenteele onderzoekingen was bepaald. Dit zou dus de diameter zijn van de electronbaan in den eersten stationnairen toestand van het waterstofatoom, in geval de praemissen voor de berekening in orde geweest waren. Op analoge wijze kan men berekenen, dat de diameter van de baan, overeenkomende met een losrukkingsarbeid van $\frac{13,5}{4}$, en beantwoordende aan den tweeden stationnairen toestand van het waterstofatoom, gelijk wordt aan $2^2 \times 10^{-18}$ cm, dus 4 maal zoo groot. Voor den derden stationnairen toestand vindt men een diameter $3^2 \times 10^{-8}$, enz.

Waar wij nu toch eenmaal bezig zijn, in strijd met Bohrs postulaat de klassieke mechanica toe te passen, zullen wij voor een moment alle verdere bedenkingen over

boord zetten, en de snelheid der electronen in de eerste baan, die met een diameter van 10^{-8} cm, een omloopfrequentie van $6{,}6 \times 10^{15}$ per seconde bezit berekenen. In de volgende baan, die 4 maal zoo groot is, kan het electron „slechts" $0{,}82 \times 10^{15}$ omwentelingen per seconde volbrengen, dus 8 maal zoo weinig als in de eerste baan. Voor de derde baan, die 9 maal zoo groot is als de eerste, wordt dit aantal 27 maal zoo klein.

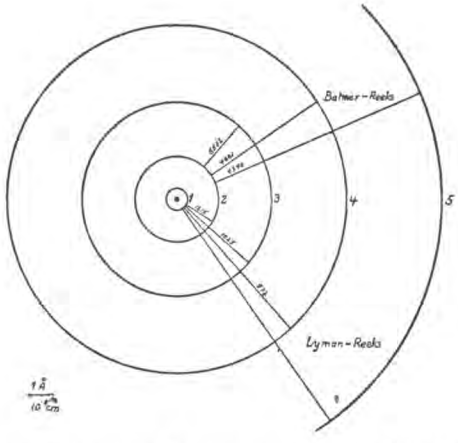


Fig. 17. Schematische voorstelling van een electronenbaan in het waterstofatoom.

De aandacht moet er op gevestigd blijven, dat deze „omloop"getallen niet het minste te maken hebben met het trillingsgetal der spectraallijnen van waterstof, van welk feit wij ons gemakkelijk kunnen overtuigen, door de berekende omloopgetallen te vergelijken met de frequenties, die bij de lijnen der Balmerreeks behooren. De eerste van deze lijnen, de waterstoflijn met golflengte 6562,80 Å, heeft namelijk een trillingsgetal van $0{,}43 \times 10^{15}$ Hertz, terwijl de volgende lijn met

een golflengte van 4861,38 Å een frequentie heeft van $0{,}61 \times 10^{15}$ Hertz.

Deze berekeningen van electronenbanen, die gedeeltelijk op valsche veronderstellingen berusten, bieden het voordeel, dat men zich een beeld kan vormen van de verschillende stationnaire toestanden van het waterstofatoom. In figuur 17 zijn de eerste der onderscheiden electronenbanen als concentrische cirkels aangegeven; de zwarte punt in het midden stelt de kern voor. Men ziet, dat de grootte der banen sterk toeneemt, aangezien de diameters zich immers verhouden als 1 : 4 : 9 : 16 enz. Op de figuur zijn verder verbindingslijnen tusschen de verschillende banen geteekend, die de overgangen aanduiden, waarmede het waterstofspectrum wordt uitgezonden. Men ziet, dat de lijnen der Balmerserie overeenkomen met de overgangen van de banen $n = 3, 4, 5$, enz. tot de baan $n = 2$. Ten slotte zijn nog aangegeven de overgangen van de banen $n = 2, 3, 4$, enz. naar de baan $n = 1$, die behooren bij een geheele nieuwe reeks in het waterstofspectrum. [5]) Deze reeks, waarvan het bestaan door Bohrs theorie zeer waarschijnlijk gemaakt was, werd enkele jaren later door den Amerikaan Lyman gevonden in het deel van het ultraviolette spectrum, dat de allerkortste golven bezit en dat zeer moeilijk is waar te nemen.

Maar tegen al deze beschouwingen over de banen en omloopfrequenties der electronen in het waterstofatoom is aan te voeren, dat zij berusten op de veronderstelling, dat de klassieke mechanica toegepast mag worden binnen het atoom, hetgeen, naar wij weten,

---

5) Het trillingsgetal $= \frac{3{,}3 \times 10^{15}}{1^2} - \frac{3{,}3 \times 10^{15}}{n^2}$, waarin $n = 2, 3, 4, 5$, enz.

in het algemeen niet het geval is. Wanneer wij deze beschouwingen toch gegeven hebben, berust dit hierop, dat zij den eenigen bruikbaren weg vormden om verder te komen met het begrip van den bouw der atomen; bovendien stemmen zij, zooals door Bohr is aangetoond voor een niet gering gedeelte met de waarheid overeen. Bohr wees er namelijk op, dat er een regelmatige overgang moest bestaan van de gewone wetten der physica naar die, welke binnen de atomen gelden, zoodat er een gebied moet bestaan, waarop de natuurwetten van beide groepen bij benadering geldigheid bezitten. In dit grensgebied zal men, wat het waterstofatoom betreft, komen, wanneer men electronenbanen met zeer groote waarden voor n beschouwt, aangezien de banen dan afmetingen krijgen in een orde van grootte, waarmee in de gewone physica gewerkt wordt. De baan $n = 1000$ bijvoorbeeld zal een diameter hebben van $1000 \times 1000 \times 10^{-8}$ cm $= {}^1/_{10}$ mm. Voor zeer groote waarden van n is men daarom volkomen gerechtigd, de genoemde berekeningen van het omloopgetal uit te voeren en dat gelijk te stellen aan de frequentie van het uitgezonden licht. Anderzijds geldt ook in dit gebied Bohrs tweede postulaat, dat onmiddellijk het trillingsgetal geeft van het licht, dat uitgezonden wordt bij den overgang tusschen twee opvolgende banen van de genoemde grootte-orde.

Daar het berekende omloopgetal afhangt van de lading en de massa van het electron en de kern, kon Bohr, door het omloopgetal gelijk te stellen aan de, volgens het tweede postulaat gevonden, frequentie, een vergelijking opstellen, die het mogelijk maakte, de constante van Rydberg te berekenen, uitsluitend met behulp der bekende waarden voor de Plancksche con-

stante en voor de lading en de massa van electron en kern. Deze berekening gaf een waarde van $3{,}3 \times 10^{15}$ Hertz, in volkomen overeenstemming met de waarde der constante van Rydberg, zooals die gevonden was bij spectroscopische metingen. Dit was de eerste groote triomph voor de theorie van Bohr, aangezien iets van de geheimzinnigheid, die de Balmerreeks steeds omgeven had, begon te verdwijnen, en de constante van Rydberg in verbinding gebracht kon worden met de eigenschappen van bouwsteenen der atomen.

Bohrs berekening der Rydbergsche constante onderscheidt zich door haar volkomen mathematische nauwkeurigheid, hetgeen daarmee samenhangt, dat de berekening berust op het bestaan van een overgangsgebied, waarin zoowel de klassieke als de atoomphysica geldigheid bezitten. Dit brengt weer mede, dat de berekeningen van alle banen in het waterstofatoom als bij benadering juist beschouwd mogen worden, zoodat het verantwoord is, de gemaakte voorstelling der banen te gebruiken, wanneer geen zeer hooge nauwkeurigheidsgraad vereischt wordt.

Wij kunnen ons de lichtuitzending door een waterstofatoom op de volgende wijze voorstellen: in een gewoon waterstofatoom zullen de electronen loopen in de kleinste baan ($n = 1$); men zegt dan, dat het atoom zich in den grondtoestand bevindt, waarvan de „losrukarbeid" 13,5 electron-Volt bedraagt. Bij electrische ontlading of bij hooge temperatuur kan het atoom aangeslagen worden, d.w.z. de electronen worden in een grootere stationnaire baan gebracht, waaruit zij na verloop van korten tijd weer terugvallen in een lagere baan, of zelfs in de binnenste, onder uitzending van een lichtquant. De lichtuitzending eindigt eerst, wan-

neer het atoom zijn normaaltoestand bereikt heeft. Een waterstofatoom, dat aangeslagen is tot een bepaalden toestand, zal dan niet àlle waterstoflijnen uitzenden, maar slechts enkele, die ontstaan, doordat het electron op zijn weg naar den normaaltoestand zich tijdelijk in één of meer der stationnaire banen ophoudt. Wanneer men niettemin in het licht, uitgezonden door een met waterstof gevulde ontladingsbuis, het heele waterstofspectrum kan waarnemen, komt dat, doordat zoo geweldig veel atomen aangeslagen zijn geworden tot verschillende energieniveaux, dat alle mogelijke overgangen tusschen de verschillende toestanden voorkomen.

Beschouwingen als deze gelden intusschen niet alleen voor het waterstofatoom, doch voor elk atoomsysteem met slechts één electron. Zulk een systeem kan men bijv. verkrijgen, door helium, dat normaliter twee electronen bevat, te ioniseeren. Door het verwijderen van een dezer electronen wordt het atoom tot een positief ion, bestaande uit een kern met dubbele lading, waarom heen een electron zweeft. Zulk een ion zal lichtquanten uitzenden, wanneer het overgebleven electron, na tot een hooger niveau te zijn aangeslagen, naar lageren toestand terugkeert. De uitgezonden spectraallijnen vormen dan reeksen, die gelijk zijn aan die van het waterstofspectrum, slechts met dit verschil, dat haar constante van Rydberg ten gevolge van de dubbele kernlading een andere waarde bezit. Bohr toonde met een berekening, overeenkomstig aan die van het waterstofatoom, aan, dat de constante van Rydberg voor een atoom, welks kern een grooter aantal positieve ladingen bezit, toeneemt met het kwadraat van dit aantal, zoodat men voor het spectrum van het heliumion een

constante van Rydberg moet vinden, die 4 maal zoo groot is als gewoonlijk.

Reeds vroeger had men een deel van deze lijnen waargenomen in de spectra van sommige sterren, doch verondersteld, dat zij toegeschreven moesten worden aan waterstof, daar men ze slechts te zamen met lijnen der Balmerserie had aangetroffen. Nadat Bohr had aangetoond, dat de lijnen haar ontstaan te danken hadden aan heliumionen, gelukte het aan experimenteerende natuurkundigen, het spectrum met behulp van een aardsche lichtbron teweeg te brengen, door zeer krachtige ontladingen te zenden door zuiver helium, waardoor de atomen zoowel geïoniseerd als aangeslagen werden. Op grond van de verviervoudigde constante van Rydberg krijgt de losrukbaarheid voor de verschillende stationnaire toestanden van het heliumatoom de volgende reeks waarden:

$$\frac{4 \times 13{,}5}{1^2}, \frac{4 \times 13{,}5}{2^2}, \frac{4 \times 13{,}5}{3^2}, \frac{4 \times 13{,}5}{4^2}, \frac{4 \times 13{,}5}{5^2}$$

enz., waaruit blijkt, dat iedere tweede van deze toestanden dezelfde hoeveelheid energie bezit als die van het waterstofatoom (zie pag. 72). Men zou zoodoende verwachten, dat bepaalde spectraallijnen der heliumionen samenvielen met de waterstoflijnen. Proeven toonden intusschen aan, dat de betreffende lijnen niet geheel samenvallen: er bleek een kleine afwijking te bestaan. Bohr was echter onmiddellijk in staat, dit plausibel te maken, door er in zijn berekeningen rekening mede te houden, dat de atoomkern niet stil ligt onder de beweging van het haar omcirkelende electron, doch contrabewegingen uitvoert, die echter kleiner worden naar mate de kern zwaarder is. Berekeningen

gaven, op grond van de grooter zwaarte der heliumkernen, als resultaat, dat de constante van Rydberg voor helium, in plaats van 4 maal, 4,016 maal zoo groot moest zijn als die van waterstof, hetgeen nauwkeurig overeenstemt met de aangegeven afwijking der spectraallijnen.

De verklaring was zóó bevredigend, dat men naderhand het probleem omgekeerd heeft: door nauwkeurig de genoemde golflengte-verschillen tusschen de waterstof en de heliumlijnen te meten, bepaalde men de verhouding tusschen de massa's van de waterstofkern en die van het electron. Dit is zelfs een van de nauwkeurigste methoden geworden om deze verhouding te bepalen; langs dezen weg vond men, dat de waterstofkern 1838 maal zoo zwaar is als het electron. (Vergelijk de andere wijzen ter bepaling dezer verhouding, beschreven op pag. 29).

Er bestaan nog tal van andere atoomsystemen, opgebouwd uit één kern en één electron: het dubbelgeladen lithiumatoom, d.w.z. een lithiumatoom, dat twee van zijn drie electronen verloren heeft; het berylliumatoom met drievoudige lading, enz. Volgens de theorie van Bohr zal de constante van Rydberg voor de spectra dezer ionen toenemen met het kwadraat der kernladingen, en dus voor het lithiumion 9 keer, voor het berylliumion 16 keer zoo groot geworden als die voor het waterstofatoom, indien wij de zeer kleine verandering, veroorzaakt door het grootere gewicht der atoomkern, verwaarloozen. De frequenties der spectraallijnen van deze ionen kunnen dus zonder meer afgeleid worden uit die van waterstof, door deze met 9, respectievelijk 16 te vermenigvuldigen; de golflengten, bij deze frequenties behoorend, worden natuurlijk naar verhouding korter, en beginnen die der Röntgenstralen te benaderen. Eenige jaren geleden slaagde men er in, door middel van zeer krachtige electrische vonken, den vereischten ionisatiegraad der atomen te be-

werkstelligen, en hun spectraallijnen te photographeeren; deze bleken precies de golflengten te bezitten, die door Bohr voorspeld waren.

De regel, dat een atoomsysteem, bestaande uit een kern met de lading N, waaromheen zich een electron beweegt, een constante van Rydberg heeft, die N^2 zoo groot is als die voor waterstof, bezit dus algemeene geldigheid. De stationnaire toestanden van zulk een op waterstof gelijkend ion bezitten bij gevolg hoeveelheden losrukbaarheid, die gevonden worden uit de formule $N^2 \times \frac{13,5}{n^2}$, door n de waarde te geven van eenvoudige geheele getallen. De verhoudingen worden uit den aard der zaak ingewikkelder, wanneer men tracht, Bohrs theorie toe te passen op atoomsystemen, die meer dan één electron bevatten, maar de spectra van alle atomen bezitten zeer bepaalde eigenschappen, die op grond van die theorie zeer gemakkelijk verklaard kunnen worden. Zooals reeds eerder naar voren gebracht, toonde Rydberg aan, dat de constante $3,3 \times 10^{15}$ in de spectra van alle atomen terug gevonden wordt. Bohr gaf voor dit verschijnsel als verklaring, dat ook in de meer samengestelde atomen één der electronen hoofdzakelijk de uitzending van licht veroorzaakt op de wijze als voor het waterstofatoom is uiteengezet.

Dit z.g. lichtelectron kan meer of minder sterk aan het atoom gebonden zijn en daardoor aanleiding geven tot het ontstaan van stationnaire toestanden met hoeveelheden energie, waarvan de verschillen de trillingsgetallen der uitgezonden spectraallijnen geven in overeenstemming met Bohrs tweede postulaat. Van de overige atomen wordt daarentegen aangenomen, dat

zij op deze energie-niveaux ieder in dezelfde vaste banen loopen. Wordt de baan van het lichtelectron zeer groot in verhouding tot die der overige electronen, dan zal zij op een overeenkomstige baan in het waterstofatoom gaan gelijken, terwijl de negatieve ladingen der overige electronen te zamen met de positieve lading van de kern practisch gesproken het effect zullen hebben als van een kern met slechts één positieve lading.

Bovengenoemde overwegingen, die Bohr in staat stelden, de constante van Rydberg uit te drukken in de Plancksche constante en in de lading en de massa van electron en kern, zouden dus evenzeer toegepast kunnen worden op het lichtelectron in een willekeurig atoom. Bij gevolg verklaart de aanname van een lichtelectron het optreden van de Rydbergsche constante van waterstof in de spectra van alle atomen.

Wij zullen ons nu voorloopig niet verdiepen in nog meer resultaten der spectroscopie, doch slechts naar voren brengen, dat deze, op grond van de uitzonderlijke nauwkeurigheid, waarmede spectroscopische metingen verricht kunnen worden, een zeer uitzonderlijke rol gespeeld hebben als toetssteen voor de atoomtheorie. Als voornaamste resultaat kunnen wij vaststellen, dat Bohrs atoomtheorie ons dus in staat gesteld heeft, de resultaten der spectroscopie door stationnaire toestanden in de atomen te verklaren, zoodat men voor het spectrum van ieder element den energie-inhoud van al de stationnaire toestanden, die in het element voorkomen, kan berekenen.

De atoomtheorie wint veld

Dadelijk na haar lanceeren ontmoette Bohrs atoomtheorie, die op zulke revolutionnaire veronderstellingen

gebaseerd was, veel weerstand, al moest men zich anderzijds onderwerpen aan het bewijsmateriaal, dat de spectroscopische onderzoekingen hadden opgeleverd. Het bewijsmateriaal werd trouwens nog uitgebreid door nieuwe experimenten, waarvan de treffendste was een directe meting van de energie der atomen in de stationnaire toestanden met behulp van electrische methodes. Laten wij eerst in herinnering brengen, hoe groot de hoeveelheden energie zijn, die gemeten moeten worden. De arbeid, die verricht moet worden, om het electron van een waterstofatoom uit zijn baan vrij te maken, en geheel uit het atoom te verwijderen, door ons straks losrukarbeid genoemd, bedraagt voor den eersten stationnairen toestand volgens Bohrs theorie 13,5 electron-Volt. Evenzoo kan men de energie berekenen, die noodig is om den overgang van den grondtoestand uit tot een der hoogere toestanden te bewerkstelligen: de aanslagenergie. Dit geschiedt namelijk, door eenvoudig den arbeid, benoodigd om het electron uit de hoogere stationnaire toestanden te bevrijden, te berekenen, en de gevonden waarde af te trekken van de hoeveelheid arbeid, benoodigd voor bevrijding uit den normalen toestand. Men vindt dan b.v. voor twee achtereenvolgende toestanden van het waterstofatoom respectievelijk $\frac{13,5}{4} = 3,4$ Volt, en $\frac{13,5}{9} = 1,5$ Volt, zoodat de aanslagenergie voor deze toestanden wordt: $13,5 - 3,4 = 10,1$ Volt, en $13,5 - 1,5 = 12$ Volt. Daar de losrukarbeid voor de hoogere toestanden snel afneemt tot nul, nadert de aanslagenergie voor hoogere toestanden snel den losrukarbeid voor den normaaltoestand, gelijk aan 13,5

Volt, die ook wel ioniseeringsenergie genoemd wordt.

Wij zien dus, dat de hoeveelheden energie, die gemeten moeten worden, van overeenkomstige grootte zijn als de hoeveelheden energie, waarmede men bij de photo-electronen te maken had. De thans toe te passen meetmethodes kunnen dus van overeenkomstigen aard zijn als die, gebruikt bij de metingen van het photo-electrisch effect. Dergelijke directe metingen van de aanslag- en ioniseeringsenergie der atomen werden de eerste maal uitgevoerd door de Duitschers Franck en Hertz in 1913–'14. Op grond van practische overwegingen kozen zij echter kwikzilveratomen als proefobject in plaats van waterstofatomen. Het principe was het volgende: men bombardeerde atomen met electronen, waarvan de snelheid, en dus ook de bewegingsenergie, nauwkeurig bekend was. De kans bestond, dat de electronen zouden botsen met eenige der atomen en daarbij iets van hun energie zouden afgeven; door nu het energieverlies van deze electronen te meten, zou men te weten kunnen komen, hoeveel energie aan de atomen was afgegeven.

Het apparaat, daartoe gebruikt, was ongeveer ingericht als een radio-lamp: het bestond uit een glazen buis (zie figuur 18), waarin een gloeidraad, een rooster en een anode waren aangebracht; laatstgenoemde werd verbonden met een galvanometer, zoodat men den electronenstroom kon meten. Den electronen, uitgezonden door den gloeidraad, kon men de gewenschte snelheid geven, door aan het rooster een bepaalde spanning aan te leggen; een deel dezer electronen moest uit den aard der zaak botsen met atomen van den kwikzilverdamp, waarmede de buis gevuld was. Verhoogde men nu geleidelijk de roosterspanning, dan bleek, dat de

electronenstroom naar de anode, juist als in een gewone radio-lamp, regelmatig toenam naarmate de snelheid der electronen steeg. Plotseling echter, toen de spanning 4,9 Volt overschreed, daalde de stroom sterk tot een veel lagere waarde, evenwel om met een nog meer verhoogde roosterspanning weer te gaan toenemen. Dit merkwaardige resultaat was slechts te verklaren door aan te nemen, dat een deel der electronen bij deze

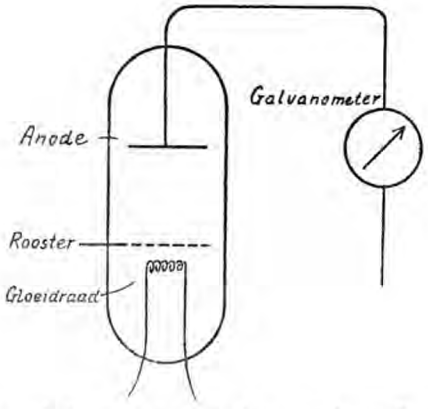


Fig. 18. Schematische teekening van het toestel van Franck en Hertz

energie van 4,9 electron-Volt begint bewegingsenergie af te geven aan de kwikzilveratomen. Een bepaalde minimum snelheid der electronen was kennelijk noodig, om de kwikzilveratomen van den normalen in een aangeslagen toestand te brengen. De energie van 4,9 electron-Volt, die de electronen aan de atomen afgaven, bleek, tot groote vreugde van de aanhangers der atoomtheorie, nauwkeurig overeen te komen met de grootte van de laagste aanslagenergie van het kwikzilveratoom, zooals die uit het kwikzilverspectrum bekend was.

Dergelijke proeven met electronenbombardementen werden spoedig tot verscheidene stoffen uitgebreid, waarbij men er zich bovendien niet toe bepaalde, de aanslagenergie voor de laagste stationnaire toestanden te meten; men slaagde er tevens in, dank zij een verfijnde techniek, zoowel de aanslagenergie voor de hoogere toestanden als de ioniseeringsenergie te bepalen. Voor al de onderzochte elementen vond men een volkomen overeenstemming met de hoeveelheden energie, die men met behulp van Bohrs theorie kon berekenen uit de spectra der betreffende atomen. De experimenten bleken dus op onomstootelijke wijze aan te toonen, dat Bohrs postulaten een algemeene geldigheid bezitten.

Later is het ook gelukt, dergelijke electronenbombardementen op waterstof uit te voeren, waarbij men vond, dat de ioniseeringsenergie juist 13,5 Volt bedroeg, eveneens in overeenstemming met de waarde, gevonden door berekening uit het spectrum. Ter vergelijking moge vermeld worden, dat de ioniseeringsenergie voor een heliumatoom, 24,46 Volt bedraagt, voor een kwikzilveratoom 10,4 Volt en voor een lithiumatoom 5,4 Volt, terwijl de ioniseeringsenergie voor alle elementen tusschen $\pm$ 4 en $\pm$ 25 Volt gelegen is. (Vergelijk figuur 22).

Door een merkwaardige verandering in de proefopstelling slaagde men er nog later eveneens in, het spectrum waar te nemen van het licht, dat uitgezonden wordt door atomen, die uit aangeslagen naar lagere toestanden terugkeeren. Men deed dit voor verschillende stoffen, door een reeks spectraalphoto's te maken van de lichtverschijnselen tusschen rooster en anode, terwijl inmiddels de snelheid der electronen geleidelijk verhoogd werd. Deze opnamen vertoonden bij de lagere spanningen op den rooster slechts zeer weinige spectraallijnen, terwijl nieuwe lijnen ontstonden juist bij die spanningen, welke berekend waren op grond van Bohrs theorieën.

Behalve dat de proeven met de electronenbombardementen dus in alle opzichten een bevestiging gaven van Bohrs theorie, brachten zij tevens een dieper inzicht in hetgeen plaats vindt, wanneer een atoom geïoniseerd wordt.

Oorzaak en ontstaan der Röntgenspectra

Van alle gebieden der physica stroomden nu nieuwe opgaven binnen, waarmede de atoomtheorie zich bezig had te houden. Ook de onderzoekers, die zich met Röntgenspectroscopie occupeerden, deden nieuwe vondsten en verzochten een verklaring van de merkwaardige regelmatigheden, die zij ontdekt hadden in de karakteristieke Röntgenspectra der elementen. De Engelschman Bragg slaagde er het eerst in, de methode van von Laue ter bepaling van de golflengte der Röntgenstralen bij interferentie in kristallen, te vervolmaken, door een Röntgenspectograaf te construeeren, waarmede het mogelijk is, een spectrum van Röntgenstralen op een photographische plaat vast te leggen, zoodat men hun golflengte gemakkelijk en nauwkeurig kan meten. Een andere Engelsche natuurkundige, Moseley, ondernam in 1914 met zulk een Röntgenspectograaf een systematisch onderzoek van de karakteristieke Röntgenspectra der elementen. Hij vond toen, dat deze in den grond van de zaak hun naam niet verdienden, aangezien het beeld van het spectrum hetzelfde bleef, wanneer men van de eene stof naar de andere overging; slechts de golflengten vertoonden eenige verschillen. Figuur 19, Plaat V geeft een reeks van Moseley's opnamen weer, waarop men ziet, hoe de „karakteristieke" lijnen verschuiven in de richting van kleinere golflengten, wanneer het atoomgewicht toeneemt. Door nauw-

keurige meting der golflengten van deze lijnen slaagde Moseley er in, een verrassend eenvoudig verband te vinden tusschen het trillingsgetal en het atoomnummer van een stof. Het trillingsgetal van de sterkste lijn in het spectrum bleek bijvoorbeeld toe te nemen volgens het kwadraat van het atoomnummer. Deze z.g.n. verschuivingswet van Moseley werd onmiddellijk verklaard door Bohr, die aannam, dat deze Röntgenspectraallijnen ontstonden door sprongen van een electron tusschen kort bij de kern gelegen banen. Voor deze naar binnen gelegen electronen zal de aantrekking door de kern namelijk een overwegend groote waarde bezitten in verhouding tot het afstandeffect der andere electronen, zoodat hun energietoestanden vrijwel gelijk zijn aan de waarden, die zouden optreden, wanneer alle buitenelectronen verwijderd waren. Wij kunnen dan zonder meer de resultaten in toepassing brengen, die Bohr vond voor op waterstof gelijkende ionen. Voor deze gold immers, dat (zie pag. 81), wanneer de lading der kern N elementairladingen bedraagt voor het losmaken der electronen uit de stationnaire toestanden, een arbeid $N^2 \times \frac{13,5}{n^2}$ noodig was, waarbij n de waarden 1, 2, 3, enz. aanneemt. Een deeling met de Plancksche constante geeft ons voor een lichtquant, die uitgezonden wordt bij den sprong van een electron tusschen de banen $n = 1$ en $n = 2$ in een atoom met kernlading N, een trillingsgetal:

$$N^2 \times 3,3 \times 10^{15} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) = {}^3/_4 \times N^2 \times 3,3 \times 10^{15}$$

Dit verklaart onmiddellijk den door Moseley gevonden regel aangaande de toename van het trillingsgetal met het quadraat van het atoomnummer, wanneer men,

zooals reeds eerder aangenomen, het atoomnummer identificeert met het aantal elementairladingen der kern. Tevens benaderde de formule de gemeten trillingsgetallen vrij nauwkeurig, wanneer men voor het atoomnummer N de getallenwaarde invulde. Voor een stof bijvoorbeeld als koper met $N = 29$, heeft de sterkste Röntgenlijn een golflengte van 1,5 Å, overeenkomende met een trillingsgetal van $\pm 2 \times 10^{18}$ Hertz, terwijl men door $N = 29$ te nemen in de formule van Bohr, voor het trillingsgetal een waarde van $2{,}1 \times 10^{18}$ Hertz vond. Deze overeenkomst wordt des te treffender, wanneer men overweegt, dat Bohrs oorspronkelijke theorie in het geheel niets met Röntgenspectra uit te staan had; zij was uitgewerkt voor de optische spectra, welker golflengten duizenden malen grooter zijn dan die der Röntgenstralen. De overeenstemming toont intusschen aan, dat Bohrs algemeene beginselen voor de uitzending van licht door atomen ook geldigheid bezitten voor toestanden kort bij de kern. Zelfs het kleine verschil tusschen het berekende en het gemeten trillingsgetal is begrijpelijk: het is toe te schrijven aan het feit, dat men niet geheel en al de werking mag verwaarloozen van de overige electronen, welker negatieve lading toch altijd nog een weinig de positieve lading der kern tegenwerkt, zoodat men bij de berekening der frequentie eigenlijk een eenigszins kleinere waarde voor N zou moeten invullen dan met het atoomnummer overeenstemt.

Beschouwen wij thans een niet aangeslagen atoom met vele electronen. Ook deze bewegen zich niet in een chaotischen wirwar om de kern, maar zijn verdeeld over de stationnaire banen, die in een waterstofatoom of in een op waterstof gelijkend ion gekarakteriseerd worden door de getallen $n = 1, 2, 3, 4$, enz. Normaliter

zal zulk een atoom geen straling uitzenden; verliest het echter op een of andere manier een electron, bijv. in de binnenste baan, dan is voor een electron uit de andere banen de mogelijkheid geschapen, een sprong naar binnen te maken. Hiervan getuigt het Röntgenspectrum onmiddellijk rapport uit. De genoemde mutatie geschiedt gewoonlijk, zooals bij ambtenaren het geval pleegt te zijn, namelijk van den eerstvolgenden lageren rang af, welke daardoor voor een nog lager geplaatsten vacant komt, enz. Ook gebeurt het wel, dat een electron een snelle promotie maakt met voorbijgaan van een aantal banen, doch dit behoort tot de zeldzaamheden. De sprong, van de baan $n = 2$ uit, komt dus in het atoom het veelvuldigste voor, en de daarmede correspondeerende lijn in het Röntgenspectrum moet dus ook het sterkst zijn. Het trillingsgetal van die sterkste lijn vinden wij uit eerder genoemde formule. De sprong van de baan $n = 3$ naar de binnenste baan komt, zooals gezegd, veel zeldzamer voor; ook de bijbehoorende lijn met de grootere frequentie en overeenkomstig kleinere golflengte wordt aanzienlijk zwakker, zooals ook uit figuur 19 blijkt, waar de linker lijn voor elke stof de zwakste is. [6])

Wij kunnen verwachten, dat er ook Röntgenlijnen met grootere golflengte bestaan. Indien er namelijk in de baan $n = 2$ een electron ontbreekt, kan er bij de sprong van een electron uit de baan $n = 3$ of $n = 4$ naar die met $n = 2$ een straling uitgezonden worden met een golflengte, overeenkomende met het geringere

---

6) Het trillingsgetal $= N^2 \times 3{,}3 \times 10^{15} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2}\right) =$

$= \frac{8}{9} N^2 \times 3{,}3 \times 10^{15}$ Hertz.

energieverschil dezer banen. Zulke spectraallijnen zijn vooral onderzocht door den Zweed Siegbahn, die de Röntgenspectroscopie tot den hoogsten graad van volmaaktheid heeft gebracht en precisiemetingen van de Röntgenspectra van alle elementen heeft uitgevoerd. Deze langgolvige Röntgenstralen zijn, in tegenstelling tot die met kleinere golflengte, zeer zacht, d.w.z. zij bezitten een zeer gering doordringingsvermogen, zoodat zij zelfs niet in staat zijn, door lucht heen te dringen. Siegbahn moest daarom speciale luchtledige spectrografen construeeren, die met de Röntgenbuis één geheel vormen, zoodat de stralen onbelemmerd hun weg kunnen vervolgen van de antikathode naar het kristal en vandaar naar de photographische plaat. Op figuur 20 van Plaat V is zulk een vacuumspectrograaf afgebeeld. De Röntgenbuis is bevestigd aan de voorzijde, terwijl het deksel van de eigenlijke spectograaf is verwijderd, zoodat het kristal en de plaathouder zichtbaar zijn. Door de onderzoekingen van Siegbahn kreeg men waardevolle gegevens over de verdeeling der electronen over de verschillende stationnaire banen der onderscheidene atomen. De eerste eisch om een Röntgenspectrum te kunnen vormen is dus, een electron vrij te maken uit een van de banen, die kort bij de kern van het atoom gelegen zijn. De energie, daartoe benoodigd, bedraagt voor de meest centraal gelegen baan $N^2 \times 13{,}5$ electron-Volt. Van een stof als koper, waarvan het atoomnummer 29 bedraagt, vindt men dus, dat circa 10.000 electron-Volt benoodigd zijn, terwijl men voor wolfram met atoomnummer 74 niet minder dan 70.000 Volt behoeft. Daar men Röntgenstralen teweegbrengt door een stof met electronen te bombardeeren, moeten deze dus een minstens even groote bewegingsenergie bezitten, willen

zij bij een botsing het electron uit de binnenste baan kunnen losrukken. De genoemde bedragen zijn dus de kleinste spanningen, die aan de Röntgenbuis aangelegd moeten worden, willen wij kunnen verwachten, dat de gewenschte Röntgenspectraallijnen gevormd worden, hetgeen klopt met de ervaring, dat er steeds een zekere minimumspanning noodig is om een bepaalde lijn te voorschijn te roepen.

De regelmatigheden der Röntgenspectra bleken dus in alle opzichten verklaard te kunnen worden met Bohrs theorie, hoewel die slechts opgesteld was in verband met optische spectra. Dat zij niettemin bruikbaar bleek voor geheel nieuwe ervaringsgebieden was natuurlijk een der sterkste bewijzen, dat er wel veel waars moest schuilen in de door haar gegeven voorstelling van den bouw der atomen.

Het kaartsysteem der elementen en het atoomnummer

Natuuronderzoekers zijn veelal ordelijke menschen, aangezien een groot deel hunner bedrijvigheid er op gericht is, hun ervaringen op zoodanige wijze samen te vatten en te classificeeren, dat de meest uiteenloopende ervaringen onder gemeenschappelijke gezichtspunten gebracht worden. Deze neiging is intusschen niet zoozeer een schoolmeesterachtige zin voor orde, doch houdt daarmede verband, dat in de Natuur, ondanks de verscheidenheid van haar voortbrengselen, zekere regelmatigheden blijken te heerschen, die de natuuronderzoekers in den regel eerst op het spoor komen, wanneer de waarnemingen systematisch geordend zijn. Misschien het meest sprekende voorbeeld hiervan vindt men niet in de natuurkunde, doch in de plantkunde, waar de Zweed Linnaeus er in slaagde, het

schier onbegrensde aantal variaties, die de flora kent, in één systeem onder te brengen. Nadat de scheikundigen er in geslaagd waren, aan te toonen, dat alle materie opgebouwd is uit plus minus 90 elementen met scherp omschreven eigenschappen, deed zich echter in de natuur- en scheikunde het streven gelden, ook de elementen naar hun eigenschappen in een classificatiesysteem onder te brengen. In de vorige eeuw ontdekten de Rus Mendelejeff en de Duitscher Lothar Meyer voor de elementen het z.g.n. periodieke systeem: wanneer de elementen in de volgorde hunner atoomgewichten geplaatst worden, bleken bepaalde physische en chemische eigenschappen in deze reeks met bepaalde intervallen terug te keeren. Deze periodiciteit bleek echter slechts nauwkeurig te gelden wanneer men aannam, dat er bepaalde hiaten in de reeks bestonden, overeenkomende met nog niet ontdekte elementen. Langs dien weg kon men de eigenschappen van enkele dezer nog ontbrekende elementen zoo nauwkeurig voorspellen, dat men op grond van die gegevens er in slaagde, ze ook inderdaad te ontdekken. Dit was voldoende om het groote belang aan te toonen van de elementenkartoteek, die het periodieke systeem feitelijk is. Echter eerst na de ontwikkeling der atoomtheorie begon men in te zien, hoe vèrstrekkend de wetten zijn, die aan het periodieke systeem ten grondslag liggen, terwijl men er ook toen eerst in slaagde, door de ontdekking van nieuwe, zeldzame elementen nog overgebleven hiaten te vullen. Het belangrijkste hulpmiddel bij de physische herziening van het kaartsysteem der elementen was de Röntgenspectroscopie en in het bijzonder de door Moseley gevonden verschuivingswet, die het buitengewoon gemakkelijk maakte, de reeks der elementen

te controleeren, aangezien het eventueele ontbreken van een element onmiddellijk moest blijken uit een schijnbaar te sterke verschuiving der spectraallijnen ter plaatse van het hiaat. Volgens Bohrs theorie der Röntgenspectra kan men bovendien de kernlading van een atoom en daarmede van het atoomnummer onmiddellijk bepalen, wanneer men de frequentie der Röntgenstralen kent. Door zulk een systematische bewerking van alle Röntgenspectra kon dus niet alleen vastgesteld worden, welke elementen nog ontbraken, maar bovendien werden de juiste atoomnummers der elementen geverifieerd. Terwijl men de elementen vroeger slechts naar stijgend atoomgewicht gerangschikt had, werd het nu duidelijk, dat men ze volgens de grootte van de kernlading zou moeten ordenen, wilde de periodiciteit der eigenschappen tot haar volle recht komen. Overigens bleek, dat beide rangschikkingswijzen, op slechts enkele uitzonderingen na, dezelfde volgorde opleverden.

Figuur 21 geeft een schema van het periodieke systeem der elementen. Bij elk element zijn het atoomnummer en het scheikundige symbool vóór den naam vermeld; de elementen zijn gegroepeerd in 7 reeksen, de z.g.n. perioden, waarbinnen de chemische eigenschappen van stof tot stof ongeveer gelijke variaties vertoonen. De elementen, waarvan de eigenschappen onderlinge overeenkomst vertoonen, zijn door een streep verbonden. De stoffen, die het begin van elke periode vormen, dus de metalen lithium, natrium, kalium, rubidium en caesium, de z.g.n. alcalimetalen, zijn bijvoorbeeld nauw aan elkaar verwant, hetgeen o.a. blijkt uit het feit, dat zij alle de neiging bezitten, positieve ionen te vormen bij de afgifte van een electron en uit de groote overeenkomst, die de optische spectra dezer elementen ver-

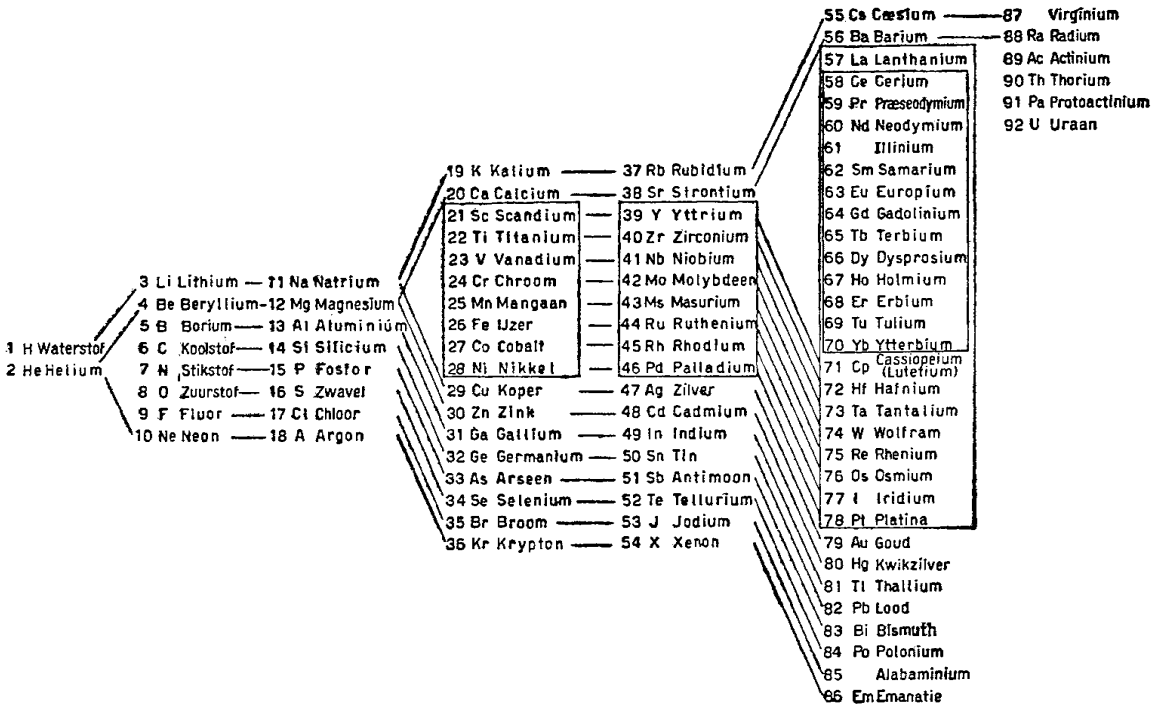

1 H Waterstof
2 He Helium
3 Li Lithium — 11 Na Natrium
4 Be Beryllium — 12 Mg Magnesium
5 B Borium — 13 Al Aluminium
6 C Koolstof — 14 Si Silicium
7 N Stikstof — 15 P Fosfor
8 O Zuurstof — 16 S Zwavel
9 F Fluor — 17 Cl Chloor
10 Ne Neon — 18 A Argon
19 K Kalium — 37 Rb Rubidium
20 Ca Calcium — 38 Sr Strontium
21 Sc Scandium — 39 Y Yttrium
22 Ti Titanium — 40 Zr Zirconium
23 V Vanadium — 41 Nb Niobium
24 Cr Chroom — 42 Mo Molybdeen
25 Mn Mangaan — 43 Ms Masurium
26 Fe IJzer — 44 Ru Ruthenium
27 Co Cobalt — 45 Rh Rhodium
28 Ni Nikkel — 46 Pd Palladium
29 Cu Koper — 47 Ag Zilver
30 Zn Zink — 48 Cd Cadmium
31 Ga Gallium — 49 In Indium
32 Ge Germanium — 50 Sn Tin
33 As Arseen — 51 Sb Antimoon
34 Se Selenium — 52 Te Tellurium
35 Br Broom — 53 J Jodium
36 Kr Krypton — 54 X Xenon
55 Cs Cæsium — 87 Virginium
56 Ba Barium — 88 Ra Radium
57 La Lanthanium — 89 Ac Actinium
58 Ce Cerium — 90 Th Thorium
59 Pr Præseodymium — 91 Pa Protoactinium
60 Nd Neodymium — 92 U Uraan
61 Illinium
62 Sm Samarium
63 Eu Europium
64 Gd Gadolinium
65 Tb Terbium
66 Dy Dysprosium
67 Ho Holmium
68 Er Erbium
69 Tu Tulium
70 Yb Ytterbium
71 Cp Cassiopeium (Lutetium)
72 Hf Hafnium
73 Ta Tantalium
74 W Wolfram
75 Re Rhenium
76 Os Osmium
77 I Iridium
78 Pt Platina
79 Au Goud
80 Hg Kwikzilver
81 Tl Thallium
82 Pb Lood
83 Bi Bismuth
84 Po Polonium
85 Alabaminium
86 Em Emanatie

Fig. 21. Het periodieke systeem der elementen. Nog niet bekend zijn de elementen nummer 61, alsmede nummers 85 en 87, waarvan aangenomen mag worden, dat zij beide radio-actief zijn.

toonen. En de laatste elementen van iedere periode, de gassen helium, neon, argon, krypton, xenon en emanatie zijn bijna identiek wat hun chemisch gedrag betreft: zij kenmerken zich alle door hun eigenschap, geen verbindingen met andere elementen te willen aangaan. Juist dit aristocratische zich op een afstand houden heeft dezen elementen den naam edelgassen bezorgd. Dergelijke overeenkomst in eigenschappen ontmoet men bij al de elementen, waartusschen in het schema verbindingslijnen getrokken zijn, bijvoorbeeld koper-zilver-goud.

De verklaring der verwantschap tusschen de elementen, zooals die uit het periodieke systeem blijkt, is nauw verbonden met de groepeering der electronen in de verschillende atomen. Door een reeks vergelijkende beschouwingen van de spectra van alle elementen, slaagde Bohr er in 1922 in, de periodiciteit te verklaren door aan te nemen, dat de electronen in ieder atoom gerangschikt zijn in bepaalde groepen of schalen, (men benoemt deze met letters en spreekt van K-schil, L-schil, enz.) die ieder slechts een bepaald aantal electronen bevatten. Bij de Röntgenspectra hebben wij reeds gezien, dat er in een atoom met vele electronen onderscheid gemaakt moet worden tusschen electronen met energie-inhoud

$\frac{N^2 \times 13{,}5}{1^2}$, en die met $\frac{N^2 \times 13{,}5}{2^2}$, enz.,

zonder dat wij er ons toen reeds een beeld van konden vormen, hoevele electronen elk dezer groepen bevat.

Laten wij thans de groepsindeeling bestudeeren, waartoe Bohrs veronderstelling leidt. Wij beginnen met het waterstofatoom, waarvan de kernlading gelijk is aan 1, en dat ook slechts één electron bevat, waarvan, om het

PLAAT VI

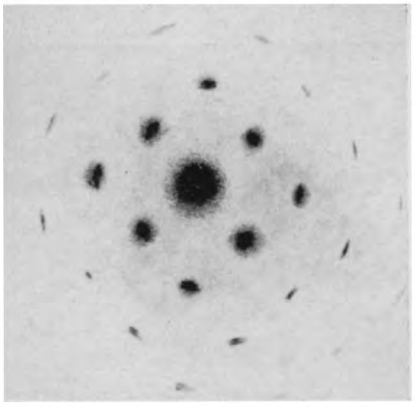


Fig. 23. Photo van interferentie van electronen bij doorgang door een platinakristal.

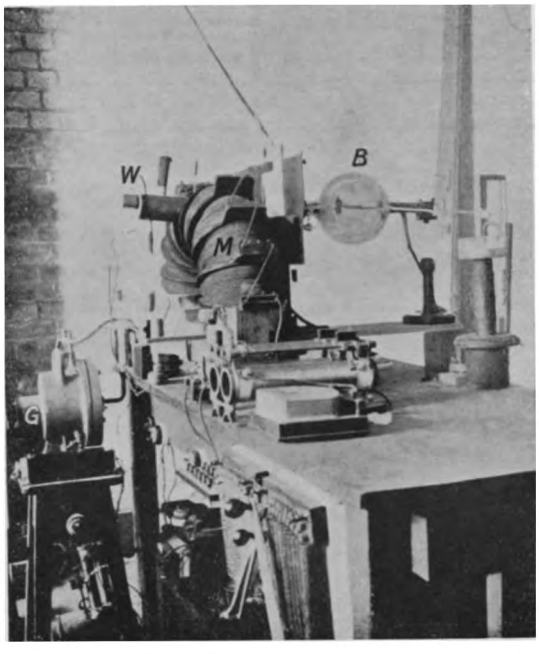


Fig. 24. De massaspectrograaf van Aston. B is de kanaalstraalbuis, M de electromagneet en C de luchtpomp. De photographische plaat wordt bij W aangebracht.

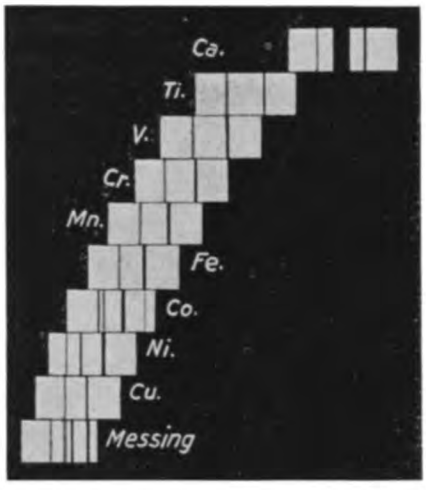


Fig. 19. Karakteristieke Röntgenspectra volgens Moseley, gerangschikt volgens stijgend atoomnummer van calcium met atoomnummer 20 tot koper met atoomnummer 29 onder weglating van nummer 21, scandium. Het onderste spectrum, dat der legeering messing, toont lijnen van haar bestanddeelen koper en zink (nummer 30).

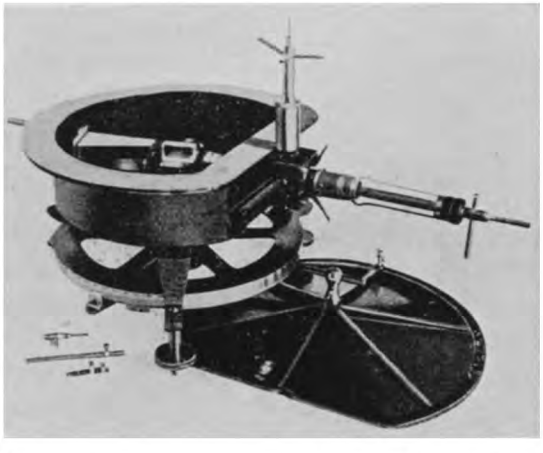


Fig. 20. Vacuum-Röntgenspectrograaf volgens Siegbahn. In het midden ziet men het kristal.

uit den normaaltoestand uit het atoom te verwijderen, 13,5 electron-Volt noodig is. Element nummer 2, helium, heeft een kernlading 2 en bevat 2 electronen, die in den normaaltoestand met gelijke sterkte aan de kern gebonden zijn. Bij het derde element, lithium, dat een kernlading 3 heeft en over drie electronen beschikt, moeten wij aannemen, dat het derde electron veel losser in het atoom gebonden is dan de twee andere, om de bovengenoemde neiging van lithium, gemakkelijk positieve ionen met positieve lading te vormen, te kunnen verklaren. Bohr veronderstelt nu, dat de eerste electronengroep, overeenkomende met $n = 2$, met lithium begint. Element nummer 4, beryllium, met kernlading 4 en 4 electronen, heeft in overeenstemming met deze opvatting de neiging, positieve ionen met dubbele lading te vormen: de buitenste twee electronen van de groep worden door het atoom bijzonder gemakkelijk losgelaten. Deze nieuwe groep blijkt, in tegenstelling met de eerste, niet begrensd te zijn tot twee electronen, aangezien het volgende element, borium met kernlading 5 en 5 electronen, ook 3 ionen met dubbele lading vormt en dus 3 betrekkelijk los gebonden electronen bevat. Gaan wij op deze wijze verder, dan blijkt, dat het volgende element koolstof, hetwelk in reacties met andere elementen neiging bezit, 4 electronen af te geven, anderzijds chemische verbindingen aangaat, die er op duiden, dat het koolstofatoom gaarne 4 electronen aan andere elementen ontrooft, wanneer daartoe gelegenheid bestaat. Voor de volgende elementen wordt laatstgenoemde neiging overheerschend: stikstof, zuurstof en fluor nemen gemakkelijk resp. 3, 2, en 1 electronen op, waarbij het totale aantal daarvan dus in alle drie gevallen 10 wordt.

Element nummer 10, neon, is, evenals helium, zeer stabiel en heeft noch de neiging negatieve ionen, noch positieve te vormen, hetgeen aannemelijk maakt, dat de electronengroep n = 2 thans geheel bezet is, zoodat zij 8 electronen blijkt te kunnen bevatten. Deze veronderstelling wordt dadelijk bevestigd door element nummer 11, natrium, dat evenals lithium één zeer los gebonden electron bezit, het eerste van de groep n = 3. In de tweede periode blijkt dus te gelden, dat de laag genummerde elementen (N = 3, 4, 5) de neiging bezitten, alle electronen van de groep n = 2 af te geven, terwijl de hoog genummerde elementen (N = 7, 8, 9) het aantal electronen van de tweede groep trachten te completeeren.

Hetzelfde verschijnsel nu blijkt zich voor te doen wanneer wij de derde periode, omvattende natrium tot argon, doorloopen. Bij de volgende perioden echter, waarvan zoowel de vierde als de vijfde 18 elementen bevat, wordt de zaak echter ingewikkelder. Wanneer men het schema van het periodieke systeem raadpleegt, ziet men, dat in deze periodes een aantal elementen omlijnd is en zoo tot een speciale rubriek gebracht, aangezien deze elementen geen overeenkomst vertoonen met eenige der voorgaande. Iets overeenkomstigs doet zich voor in de 6de en 7de periode, slechts zijn de verhoudingen hier nog gecompliceerder. Ook deze eigenaardigheden kunnen uit de atoomtheorie verklaard worden, doch het zou ons te ver voeren, op détails daarvan in te gaan. Wij zullen volstaan met de vermelding, dat de onregelmatigheden berusten op het bestaan van nevengroepen bij de hoogere electronengroepen, die echter slechts bezet worden nadat de eerstvolgende hoofdgroep reeds begonnen is. Zoo is er

bijvoorbeeld slechts één nevengroep in de derde hoofdgroep n = 3, ingenomen door argon, terwijl met kalium en calcium reeds een begin gemaakt wordt met de vierde hoofdgroep n = 4. De speciale eigenschappen, die de omlijste groep elementen (21–28) vertoont, berusten nu daarop, dat de bezetting van de groep n = 3, die nog niet voltooid was, thans vervolgd wordt. De ingelijste elementen eener periode kenmerken zich door hun geringe onderlinge verschillen wat hun chemisch gedrag betreft, hetgeen alleszins begrijpelijk is, aangezien het een centraal gelegen electronengroep is, die aangevuld wordt, terwijl het aantal en de groepeering der meer naar buiten gelegen electronengroepen, die in hoofdzaak het chemisch gedrag van een element bepalen, bijna constant zijn binnen het omlijste deel eener periode. Zeer duidelijk blijkt dit bij de elementen, die vermeld zijn in het binnenste omlijste vak van de zesde periode, de z.g.n. zeldzame aarden, waarvan de eigenschappen zóó weinig verschillen, dat de chemici de grootste moeite hebben, ze uit elkaar te houden.

Bij deze bespreking van het perodieke systeem hebben wij slechts de chemische eigenschappen der besproken elementen in het geding gebracht, doch men zou tot hetzelfde resultaat gekomen zijn, wanneer men de spectra als uitgangspunt gekozen had voor de beschouwingen over de verdeeling der electronen in de verschillende groepen. Wij kunnen er in dit verband mede volstaan, een vergelijking te maken tusschen de hoeveelheden arbeid, benoodigd om het buitenste electron uit de atomen der verschillende elementen vrij te maken. Deze waarden zijn gedeeltelijk gevonden uit de spectra der elementen, anderdeels door directe meting met behulp der methode van beschieting met

electronen. Figuur 22 brengt een en ander in beeld; op de horizontale lijn onderaan zijn de atoomnummers aangegeven, op de verticale links de ioniseeringsspanning in electron-Volt; de elementen zijn aangeduid door hun chemische symbolen. Zoo ziet men bijvoorbeeld, dat radium (Ra), dat het atoomnummer 88 bezit, een

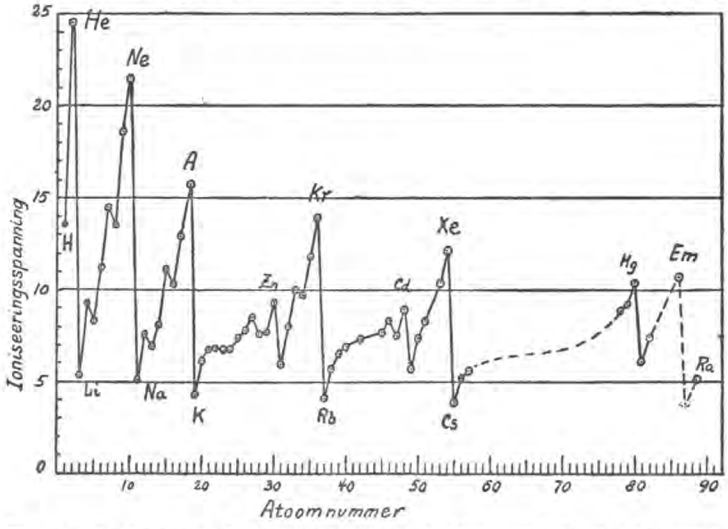


Fig. 22. De hoeveelheden ioniseeringsenergie der verschillende elementen, gerangschikt volgens hun atoomnummers

ioniseeringsenergie heeft van 5,1 Volt. Verder valt het op, dat de edelgassen maxima en de alkalimetalen minima vormen in de gebroken lijn, die alle punten verbindt, hetgeen duidelijk aantoont, dat de electronen in de edelgassen stevig gebonden zijn, terwijl zij in de alcalimetalen zeer los zitten. Uit het voorgaande blijkt ook, dat de verdeeling in perioden daarop berust, dat de onderscheidene electronengroepen in een atoom slechts een begrensd aantal electronen kunnen bevatten en dat door dit aantal de omvang der periode bepaald wordt.

Een dieper inzicht in de omstandigheid, dat deze groepen juist 2, 8, 18 enz. electronen bevatten, werd verkregen door theoretische beschouwingen van den Oostenrijker Pauli, die een regel vond (Pauli-verbod), die het aantal electronen, dat in elke groep kan voorkomen, begrenst tot $2 < n^2$. Geeft men in deze formule n de waarden 1, 2, 3, enz., dan krijgt men de getallen 2, 8, 18, 32, die men ook in werkelijkheid vindt.

Vóór wij dit terrein, dat ons de schoonheid en harmonie getoond heeft, die Bohrs geniale vertolking van het periodieke systeem der elementen aan het licht gebracht heeft, verlaten, moge nog vermeld worden, dat er ook practische resultaten geboekt zijn. Een mooi voorbeeld hiervan vormt de ontdekking van het element hafnium als direct gevolg van de nieuw verworven kennis aangaande de groepeering der electronen in de atomen. Uit de Röntgenspectra (Wet van Moseley, pagina 87) was met zekerheid bekend, dat nummer 72 ontbrak in de reeks der bekende elementen, hetgeen nog niet wilde zeggen, dat men het nu ook werkelijk ontdekt had. Overigens meende men, dat dit element in de groep der zeldzame aarden thuis behoorde, zoodat op grond van de groote zeldzaamheid der elementen uit die groep en hun overeenkomst in chemisch gedrag, de ontdekking zeer moeilijk geacht werd. Bohr echter kon aantoonen, dat de groep der zeldzame aarden moest eindigen met element nummer 70, zoodat men kon verwachten, dat element nummer 72 overeenkomst zou vertoonen met zirconium. Het was niet onwaarschijnlijk, dat deze twee verwante elementen samen in de natuur zouden voorkomen, en toen, geïnspireerd door Bohr, de Nederlander Coster en de Hongaar Von Hevesy zirconiummineralen Röntgenspectroscopisch gingen onderzoeken, vonden zij dan ook onmiddellijk spectraallijnen op de plaatsen, die volgens de Wet van Moseley overeenkomen met element nummer 72. Dit

element, dat hafnium genoemd is naar Hafnia, den Latijnschen naam der stad Kopenhagen, bleek bij nader onderzoek een veel voorkomende stof te zijn, die alle eigenschappen bezit, welke op grond van het periodieke systeem voorspeld waren.

Het beeld van den bouw der atomen, dat de natuurkundigen zich aan de hand van Bohrs atoomtheorie kunnen vormen, is natuurlijk veel meer omvattend, dan in het bestek van dit boek uiteen gezet kan worden. De atoomtheorie strekt namelijk haar invloed uit tot veel meer gebieden der wetenschap dan wij hebben kunnen noemen, en is in staat, in grove trekken de meest uiteenloopende verschijnselen te verklaren. Een der belangrijkste gezichtspunten der theorie is dit, dat bijna alle physische en chemische eigenschappen der elementen haar aanzijn te danken hebben aan het systeem der buitenelectronen. Zoowel de kleuren der elementen en hun andere optische hoedanigheden, als hun electrische en magnetische eigenschappen, alsmede hun meer of minder groote neiging, chemische verbindingen aan te gaan, worden beheerscht door het aantal en de verdeeling der electronen in de betreffende atomen. Slechts twee eigenschappen der elementen zijn onafhankelijk van het electronensysteem en moeten aan de kern worden toegeschreven: het gewicht en de radioactiviteit.

Intusschen mag men niet uit het oog verliezen, dat indirect ook het electronensysteem en de daarvan afhankelijke eigenschappen aan de kern te danken zijn, aangezien deze met haar electrische lading het aantal electronen van het systeem bepaalt. Dit brengt mede, dat men een element niet in een ander kan overvoeren door slechts een der buitenste electronen uit het atoom

te verwijderen, aangezien de kern onmiddellijk zal trachten, een nieuw electron te bemachtigen om het oorspronkelijke atoom te herstellen. Een verandering van de kernlading daarentegen zal automatisch gevolgd worden door een correspondeerende verandering in het aantal electronen, zoodat langs dezen weg wèl een nieuw element ontstaat. Waar wij in den aanvang van dit boek gezien hebben, dat de radio-activiteit steeds gepaard gaat met een verandering van elementen, kunnen wij concludeeren, dat de geladen deeltjes, die radioactieve stoffen uitzenden, afkomstig zijn van de atoomkern, in dier voege, dat de lading daarvan verandert. Wanneer een radio-actief element α-deeltjes uitzendt, die, zooals wij ons herinneren, twee positieve ladingen hebben, kunnen wij verwachten, dat de kernlading, en daarmede het aantal electronen van het atoom met twee vermindert, zoodat een nieuw element ontstaat, dat twee plaatsen lager ligt in het periodieke systeem, hetgeen ook in alle gevallen bevestigd wordt door physische en chemische onderzoekingen. Als voorbeeld hiervan zullen wij den overgang van radium in emanatie iets nauwkeuriger beschouwen. Het metaal radium, dat het atoomnummer 88 heeft, blijkt in overeenstemming met zijn plaats in het periodieke systeem een opvallende chemische overeenkomst te vertoonen met de metalen calcium, strontium en barium. Onder uitzending van α-deeltjes gaat het over in emanatie, een gassoort met eigenschappen, welke overeenstemmen met die der edelgassen, en die dan ook plaats nummer 86 in het periodieke systeem inneemt. Op geheel overeenkomstige wijze vindt men, dat de uitzending door de kern van een negatief geladen α-deeltje de lading daarvan met 1 vermeerdert, zoodat het dochterproduct één

plaats hooger in het systeem komt. Wanneer men zich de vele radio-actieve elementen herinnert, die in den stamboom der radio-actieve elementen (figuur 1) zijn genoemd, dan zal men er zich misschien over verbazen, dat deze verzameling niet vermeld is bij de andere radio-actieve elementen aan het slot van het kaartsysteem der elementen. Deze schijnbare waarde in het laatste gedeelte der kartotheek kan echter eerst in het derde hoofdstuk verklaard worden, waarin wij nog geheel nieuwe eigenschappen der atoomkern zullen leeren kennen, die een verdere indeeling van het slot van het periodieke systeem noodig maken.

Atoommechanica en een weinig philosophie

In Bohrs eerste postulaat werd, zooals wij ons herinneren, met klem naar voren gebracht, dat de tot dan toe aangenomen grondwetten der physica voor de atomen slechts bij benadering gelden. Dat Bohrs atoomtheorie niettemin zulke afdoende overwinningen wist te boeken, berustte gedeeltelijk op de omstandigheid, dat de wetten weer geldigheid krijgen, wanneer men ze toepast op zeer hooge stationnaire toestanden, maar vooral, dat de postulaten reeds het essentieele der nieuwe wetten, die in de atomen heerschen, aangeven. Een belangrijk probleem was echter nog op te lossen: de wetten der klassieke mechanica zoodanig te corrigeeren, dat men tot algemeene natuurwetten kwam, die nauwkeurige geldigheid bezitten, zoowel buiten als binnen het atoom. Deze wetten zouden het onder andere mogelijk maken, uitgaande van onze kennis van de bouwsteenen der atomen en de tusschen deze werkzame krachten, de energie in de stationnaire toestanden voor alle mogelijke atomen te berekenen. Vóór wij

nader ingaan op de exacte quantenmechanica, die de oplossing van dit probleem gebracht heeft, zullen wij eerst een uitbreiding der atoomtheorie bespreken, welke in 1925 door de Nederlanders Goudsmit en Uhlenbeck is opgesteld en die geleid heeft tot de ontdekking van nieuwe fundamenteele eigenschappen der electronen. Reeds lang was bekend, dat sommige spectraallijnen een zeer fijne structuur vertoonen, een zoogenaamd tralie. Alle lijnen in het natriumspectrum bijvoorbeeld zijn dubbel, terwijl men in andere spectra driedubbele of vierdubbele lijnen aantreft. In het licht van Bohrs postulaten was het duidelijk, dat deze zoogenaamde doubletten, tripletten, quartetten, enz. daarop moesten berusten, dat elk der correspondeerende stationnaire toestanden in werkelijkheid uit verschillende, kort bij elkaar liggende toestanden bestaat; over de dieper liggende oorzaak echter was niets bekend.

Goudsmit en Uhlenbeck nu stelden de hypothese op, dat alle atoomelectronen om hun as wentelen als kleine tollen; deze eigenschap noemt men de spin der electronen. In een ruwe vergelijking kan men zich de beweging van een atoomelectron dus voorstellen, als die van een ouderwetsch danspaar, dat, op zichzelf steeds ronddraaiende, in een grooten kring door de balzaal walst. Zooals het danspaar zoowel linksom als rechtsom kan draaien, is ook het electron in het bezit van twee draaimogelijkheden. Waar het electron steeds een electrische lading heeft en elk electrisch geladen lichaam, dat roteert, zich als een magneet gedraagt, zal het lichte electron, als gevolg van zijn spin, zoowel als van de rondloopende beweging om de kern, magnetische eigenschappen bezitten. Het lichtelectron zal zoodoende, al naar het links-om of rechts-om walsend zijn baan

beschrijft, als gevolg van de magnetische krachten het aanzijn geven aan twee stationnaire toestanden, onderscheiden door hun hoeveelheid energie. Het feit, dat de spectra der metalen lithium, natrium, kalium, enz. in hoofdzaak te danken zijn aan een los gebonden lichtelectron, verklaart, waardoor de spectraallijnen van al deze stoffen dubbel zijn. De meer ingewikkelde tripletten, quartetten, enz. in de spectra van andere stoffen kunnen ook met de spin der electronen verklaard worden, wanneer men in aanmerking neemt, dat verscheidene electronen samen kunnen werken aan de uitzending van het spectrum.

Laten wij ons thans bezighouden met de nauwkeuriger uitwerking der atoommechanica, een probleem, dat verschillende theoretici onder de natuurkundigen met behulp van sterk uiteenloopende wiskundige methodes tot een oplossing trachtten te brengen. Het eerst slaagde de Duitscher W. Heisenberg in 1925 er in, de zoogenaamde quantenmechanica op te stellen, die tot een fundamenteele oplossing van het probleem trachtte te komen door in de theorie radicaal al die grootheden buiten beschouwing te laten, die niet door experimenten konden worden waargenomen. De quantenmechanica rekent dus niet met begrippen als de baan der electronen in een stationnairen toestand of hun omloopstijd. Daarentegen werkte Heisenbergs oorspronkelijke theorie uitsluitend met de begrippen, die vervat waren in Bohrs postulaten, zooals de energiewaarden der stationnaire toestanden en de frequentie der energiequanten. Waar een nadere uiteenzetting dezer theorie zeer hooge eischen stelt aan de wiskundige scholing van den lezer, zullen wij verdere détails buiten beschouwing laten.

Een volkomen andere werkwijze werd toegepast door den Franschman De Broglie (1924) en den Oostenrijker Schrödinger (1926), die van een geheel nieuwe voorstelling van den aard der electronen uitgingen. De Broglie nam namelijk aan, dat electronen, en materieele deeltjes in het algemeen, zich onder bepaalde omstandigheden kunnen gedragen als waren zij golven.[7]) Op dat tijdstip waren er echter niet velen, die bereid waren, deze hypothese aan te nemen, aangezien zij niet vereenigbaar scheen met de voorstellingen, die men zich toen van den aard der electronen gevormd had op grond van de experimenten met afbuiging der kathodestralen, de ontdekking met de Wilson-kamer, Millikans proef, enz.

Toch waren er een paar natuurkundigen, die den moed bezaten, proeven met electronen te ondernemen om na te gaan, of het mogelijk was, het voor alle soorten van golven karakteristieke interferentieverschijnsel te voorschijn te roepen. Hierin slaagde in 1927 de Amerikaan Davisson en in 1928 de Engelschman G. P. Thomson, door een bundel electronen met een nauwkeurig bekende snelheid een kristal te laten bombardeeren. Door een photographische plaat dicht tegen het kristal aan te brengen op dezelfde wijze als in von Laue's proef met Röntgenstralen, gelukte het het optreden van interferentie vast te leggen: het bleek, dat de electronen slechts in zeer bepaalde richtingen teruggekaatst worden, juist als met Röntgenstralen van een bepaalde golflengte het geval is. Uitmeten der interferentiebeelden toonde aan, dat de betreffende golflengte verband hield met de snel-

7) Met deeltjes met massa m en snelheid v komt overeen een golflengte van $\frac{h}{mv}$, waarin h de Plancksche constante voorstelt.

heid van de uitgezonden electronen, in dier voege, dat een hooge electronensnelheid aanleiding gaf tot een kleine golflengte, hetgeen juist was, wat overeenkomstig De Broglie's theorie verwacht mocht worden. Voor een electron, dat bijvoorbeeld met een spanning van 100 Volt in beweging is gebracht, geeft de theorie een golflengte van ongeveer 1 Å, dus als die van gewone Röntgenstralen. Dit wil echter nog niet zeggen, dat de golven, waarvan hier sprake is, dezelfde physische realiteit hebben als bijvoorbeeld lichtgolven. De electromagnetische golven als die van het licht, bestaan immers uit wisselende electrische en magnetische krachten, die in principe gemeten kunnen worden met electrische en magnetische meetinstrumenten: zulks echter is niet het geval met de golven van De Broglie. Deze vormen slechts een gemakkelijk middel om uit te drukken, hoe electronen zich gedragen bij den doorgang door een kristal, waarbij de verschillende interferentiemaxima slechts de plaatsen aangeven, die bij de proef door de electronen getroffen worden, terwijl een minimum een plaats aanduidt, die niet door electronen getroffen wordt. De proeven toonden bovendien aan, dat de ligging der door interferentie ontstane zwarte vlekken op de plaat volkomen onafhankelijk is van het aantal electronen in den electronenstraal. Maakt men dit aantal zeer klein, zoodat bijvoorbeeld slechts één electron per minuut het kristal treft, dan zal dit na afbuiging steeds de plaats van een der interferentievlekken bereiken. Het is echter onmogelijk te voorspellen, welke der vlekken dit zal zijn; men kan hoogstens zeggen, hoe groot de waarschijnlijkheid is dat een electron een bepaalde vlek treft; het zijn juist de De Broglie-golven, die een berekening van deze waarschijnlijkheid mogelijk maken.

Voor wij overgaan tot een bespreking van de kennistheoretische consequenties, die men uit de interferentieproeven kan trekken, moet naar voren gebracht worden, dat het verschijnsel der De Broglie-golven op grond van ontelbare, gevarieerde proeven als onomstootelijk vaststaand beschouwd moet worden (zie bijvoorbeeld figuur 23, Plaat VI, een opname van de interferentievlekken van de electronen, die een platinakristal gepasseerd zijn en die een treffende gelijkheid vertoont met figuur 13, Plaat III, een von Laue-photo van Röntgenstralen). Een en ander mag intusschen geen beletsel vormen, ons op de gebruikelijke wijze electronen voor te stellen als kleine deeltjes met bepaalde massa, lading en magnetische eigenschappen, wanneer het andere proeven betreft dan die met kristallen. Zooals wij straks nog nader zullen zien, is de oorzaak, dat de oorspronkelijke voorstellingen bij de kristalproeven geen stand houden, slechts deze, dat de kristallen opgebouwd zijn uit atomen, die op onderlinge afstanden van ongeveer 1 Å liggen, afstanden dus, welke gelijk zijn aan de golflengte der De Broglie-golven, terwijl bij alle vroeger beschreven proeven met electronen voor deze steeds voldoende bewegingsruimte bestond.

Thans zal blijken, dat uit deze feiten een hoogst merkwaardige conclusie is te trekken, namelijk deze, dat het onmogelijk is, nauwkeurig van een electron gelijktijdig zoowel de plaats in de ruimte als de snelheid ten aanzien van grootte en richting te bepalen. Wanneer men nauwkeurig de plaats van een electron bepaalt, zal de bepaling der snelheid slechts benaderd kunnen worden, en omgekeerd zal een nauwkeurige meting der snelheid slechts een onnauwkeurige plaatsbepaling toelaten. Zooals wij zullen zien, berust deze begrenzing

niet op de onvolkomenheid der meetinstrumenten, maar volgt zij direct uit de natuurwetten, die zich in de interferentieproeven openbaren. Deze kennis brengt een volkomen nieuwe voorstelling tegenover de Natuur mede, aangezien het gebruik der klassieke mechanica juist daarvan afhankelijk is, dat men van een deeltje gelijktijdig zoowel de snelheid als de plaats kan bepalen met den graad van nauwkeurigheid, dien men wenscht.

Deze nieuwe ervaring, toegepast op verschijnselen uit het dagelijksch leven, leert ons, dat het bijvoorbeeld voor de verkeerspolitie onmogelijk zou zijn, van een auto zoowel de plaats als de snelheid nauwkeurig aan te geven. Ter geruststelling van de handhavers der wet moge hieraan dadelijk toegevoegd worden, dat de onnauwkeurigheden, die deze omstandigheid meebrengt, te verwaarloozen klein zijn in verhouding tot de onnauwkeurigheden, die het gebruik van chronometer en meetband aankleven. Maar heel anders liggen de verhoudingen, zooals wij thans zullen zien, in de wereld der atomen, en vooral in die der allerlichtste deeltjes, de electronen.

Ten einde ons deze merkwaardige kennis der theoretische consequenties nog duidelijker voor oogen te kunnen stellen, zullen wij een denkbeeldige, zeer vereenvoudigde proef doen met electronen van een bepaalde snelheid, die wij een plaat laten bombardeeren, waarin zich een gaatje bevindt ter grootte van de lengte van de De Broglie-golven der electronen. Dat zulk een proef geheel een gedachten-experiment moet blijven, berust niet alleen op het feit, dat het onmogelijk is, een gat te boren met een doorsnede van 10^{-8} cm, maar vooral daarop, dat men geen stof kent, die dicht genoeg is; alle materie immers is, waar zij is opgebouwd uit

atomen, poreus, terwijl de poriën juist de afmetingen hebben van het gat, dat wij wilden boren. De geldigheid van de conclusies, die wij uit onze denkbeeldige proef kunnen trekken, wordt hierdoor echter geenszins ondermijnd, aangezien de electronen zich steeds als golven zouden blijven gedragen, ook al werd hun slechts één opening geboden in plaats van de vele, die zich tusschen de atomen van een kristal bevinden.

Wij zullen thans eerst een oogenblik bij de klassieke mechanica in de leer gaan, ten einde ons ervan op de hoogte te stellen, hoe golven zich in het algemeen gedragen, wanneer men ze dwingt door een kleine opening te gaan, dat wil zeggen, een opening, waarvan de afmetingen niet veel grooter zijn dan de golflengte. Wij kiezen hiertoe lichtgolven, doch het resultaat is zoo algemeen, dat het voor alle soorten golven geldt. Gewoonlijk zullen lichtstralen, die loodrecht vallen op een plaat met een kleine opening, op een daarachter geplaatst scherm een scherp begrensde, witte vlek vormen ter grootte van het gat. Dit geldt echter slechts, wanneer het gat groot is in verhouding tot de golflengte van het licht; geven wij het afmetingen, die de orde van grootte van die der golflengte benaderen, dan zal de lichtvlek ten slotte grooter worden bij afnemende afmetingen van het gaatje, aangezien het licht dan sterker afgebogen wordt door den rand daarvan.

Keeren wij nu terug tot de denkbeeldige proef. Door hun golfeigenschappen zullen onze electronen, juist als de lichtstralen, afgebogen worden langs de randen van dat allerkleinste gaatje, zoodat een daarachter geplaatste photographische plaat een grootere zwarte vlek zal vertoonen, naar mate het gaatje kleiner gemaakt wordt. Stelt men zich verder voor, dat men de doorboorde

plaat beschiet met steeds minder electronen van onveranderde snelheid, zoodat er bijvoorbeeld slechts één electron per minuut door het gaatje gaat, dan zal het buigingsbeeld, evenals bij de interferentieproeven in kristallen, onveranderd blijven. De electronen zullen nu eens op de eene, dan weer op een andere plaats van de buigingsvlek vallen, zonder dat men van te voren kan zeggen waar. Over een afzonderlijk electron zal er dus een niet door berekening te achterhalen onzekerheid bestaan ten aanzien van de beweging van het electron na het passeeren van het gaatje. Hierin ontdekken wij reeds de eerder genoemde principiëele onmogelijkheid, gelijktijdig de snelheid en de plaats van een electron in een willekeurig groote mate van nauwkeurigheid te berekenen. Laten wij aannemen, dat wij de snelheid van een electron uit onze proef nauwkeurig kennen, zoowel in grootte als in richting, en dat wij iets te weten wenschen te komen over zijn plaats. Wij gaan daartoe te werk op overeenkomstige wijze als men zou doen, wanneer men wist, dat er in de Westerschelde een visch snel in West-Noord-westelijke richting zwom en men de plaats dier visch wat nauwkeuriger wilde bepalen. Men zou daartoe tusschen Vlissingen en Breskens een net dwars over de Schelde spannen; laat het dier zich vangen, dan weet men ook zijn plaats. Om het onzichtbare electron te localiseeren, gebruiken wij weer het beroemde scherm met het kleine gaatje, en plaatsen dat loodrecht op de bewegingsrichting van het electron: gaat het electron door het gaatje, dan weten wij ten minste met een nauwkeurigheid, die bepaald wordt door de afmetingen van het gaatje, waar het zich bevindt.

Maar deze kennis aangaande de plaats van het electron is gewonnen ten koste van hetgeen wij wisten

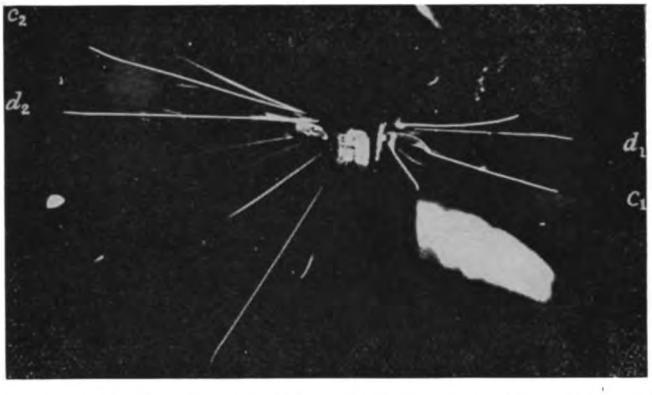


Fig. 29. Nevelkamerphoto van de splitsing van een lithiumkern. De gevormde α-deeltjes worden uitgezonden, paarsgewijze in tegengestelde richtingen. Zie C_1, C_2 en d_1 d_2.

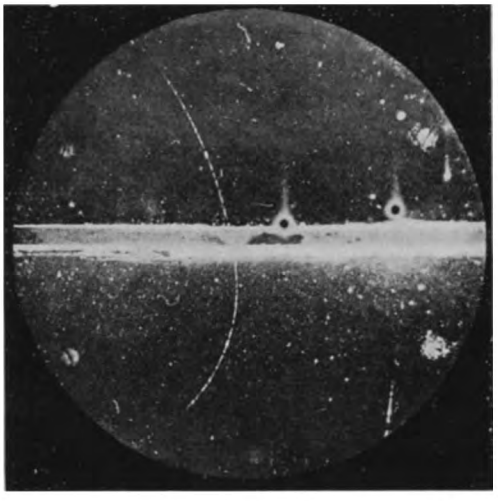


Fig. 30. De eerste nevelkamerphoto van een positron. De lichtgekleurde band over het midden duidt de looden plaat aan.

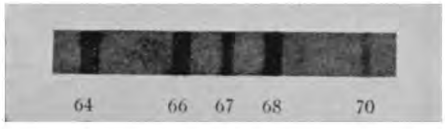


Fig. 25. Massaspectrogram van de vijf isotopen van zink; 64, 66 en 68 komen in de grootste hoeveelheden voor, 67 in kleinere en 70 slechts in zeer geringe, zooals blijkt uit de mate van zwartkleuring.

Fig. 26. Photo van de roode spectraallijn van waterstof, opgenomen bij lange belichting. Op korten afstand rechts van de grootste lijn ziet men een zeer zwakke spectraallijn, afkomstig van de zware waterstof.

Fig. 28. Nevelkamerphoto van een kunstmatige elementenmutatie; een α-deeltje stoot een proton uit een stikstofkern.

omtrent zijn bewegingsrichting, aangezien wij, nadat het electron het gaatje gepasseerd is, op grond van de afwijking, die het daarbij ondergaat, niet nauwkeurig meer kunnen zeggen, in welke richting het zich beweegt. Verhoogt men de nauwkeurigheid, waarmede de plaatsbepaling geschiedt, met andere woorden, verkleinen wij het gaatje, dan verminderen wij daarmee de nauwkeurigheid van onze kennis aangaande de richting. Maakt men daarentegen het gaatje grooter, zoodat bijna geen afbuiging meer optreedt, dan brengt dit het omgekeerde mee: de richting der beweging na het passeeren van het gaatje is met groote nauwkeurigheid bekend, doch de onzekerheid in de plaatsbepaling is groot. Men kan niet aangeven, door welk punt van het gaatje het electron gepasseerd is; men weet slechts, dat het binnen de opening moet liggen. De onzekerheid in de plaatsbepaling is dus omgekeerd evenredig aan de onzekerheid aangaande zijn snelheid. Deze zoogenaamde onzekerheidsrelatie is opgesteld door Heisenberg en nader uitgewerkt en verdiept door Bohr, die de verschijnselen, welke door de begrippen snelheid en plaats beschreven worden, complementair genoemd heeft, aangezien zij in bepaalde opzichten elkaar wel uitsluiten, doch niettemin ieder voor zich essentieele zijden van het gedrag der deeltjes tot uitdrukking brengen.

Bohr heeft in het bijzonder naar voren gebracht, dat deze complementariteit in laatste instantie daarop berust, dat voor elk verschijnsel, voor welks verloop de Plancksche constante beslissend is, een oncontroleerbare wisselwerking bestaat tusschen de betreffende objecten uit de wereld der atomen en de meetinstrumenten, gebruikt bij de waarneming dier verschijnselen. Aangezien het principieel onmogelijk is, deze wissel-

werking ooit verder te verminderen dan tot een zekere grens, die bepaald wordt door de Plancksche constante, is het eveneens onmogelijk, bij atomistische verschijnselen scherp scheiding te maken tusschen het effect van het gedrag der objecten en den invloed der meetinstrumenten.

In het genoemde denkbeeldige experiment met den doorgang van een electron door een gaatje, treedt dus een oncontroleerbare wisselwerking op tusschen het electron en de doorboorde plaat, die dient om het electron te localiseeren, doch daarbij tevens de afbuiging veroorzaakt. Deze afbuiging en daarmede de grootte der wisselwerking wordt weer daardoor bepaald, dat de De Broglie-golflengte der electronen van dezelfde orde van grootte is als de afmetingen van het gaatje, aangezien zij kleiner wordt, naarmate de golflengte vermindert, en geheel verdwijnt, wanneer de golflengte gelijk nul wordt. Uit de formule voor de golflengte (zie de voetnoot op pagina 107) blijkt, dat de Plancksche constante, hoe klein zij ook moge zijn, toch beslissend is in het verloop van atomische verschijnselen.

Terwijl zulk een complementariteit in de natuurkunde iets geheel nieuws was, waren overeenkomstige verhoudingen wel bekend van verschillende gebieden van menschelijke activiteit. Het schrijven van een boek als dit, plaatst de auteurs bijvoorbeeld voor een complementaire verhouding: het komt er immers op aan, de uiteenzetting zoo overzichtelijk en gemakkelijk leesbaar mogelijk te maken, hetgeen noodwendig meebrengt, dat de vele details en de exacte wetenschappelijke uitdrukkingswijzen, die men in de speciale vakliteratuur gebruikt, in het gedrang komen. De vakliteratuur daarentegen is voor anderen dan deskundigen weer allesbehalve gemakkelijk leesbaar. Er bestaat dus een complementariteitsverhouding tusschen overzichtelijkheid en gedetailleerdheid: wordt de eene grooter, dan wordt de andere geringer. Intusschen zijn zoowel overzichtelijkheid als uitvoerigheid noodzakelijk voor een ideale verhandeling, doch waar het niet mogelijk

is, beide te vereenigen, moet een compromis gesloten worden tusschen de complementaire begrippen. De eigenaardige toestand, geschapen door de noodzakelijkheid, in de natuurkunde met complementariteitsbegrippen te gaan werken, brengt mee, dat men bij de beschrijving van afzonderlijke atomen en electronen slechts in beperkte mate van causaliteit kan spreken. Volstrekte causaliteit eischt namelijk, dat men, gegeven de snelheid en de plaats van een deeltje op een bepaald tijdstip, deze voor elk willekeurig later tijdstip zou kunnen berekenen, als men ook de krachten kent, die op het deeltje werken. Aangezien het volgens de onzekerheidsrelatie niet mogelijk is, zoowel de snelheid als de plaats van een deeltje met willekeurig groote nauwkeurigheid te kennen, is het duidelijk, dat de praemissen voor de uitwerking van het causaal verband niet vervuld zijn. Stellig zal dit velen ter harte gaan en misschien zijn er nog wel philosophen van de oude school, die de hoop koesteren, dat men er eenmaal in zal slagen, door meer verfijnde meetmethoden een nauwkeuriger bepaling van de plaats en de snelheid der deeltjes te verkrijgen dan de onzekerheidsrelatie mogelijk maakt.

Wij zullen intusschen aan de hand van één van Bohrs denkbeeldige experimenten trachten duidelijk te maken, tot welke merkwaardige resultaten men zou komen, wanneer het, de onzekerheidsrelatie ten spijt, mogelijk was, de plaats en de beweging van een deeltje met onbegrensde nauwkeurigheid vast te stellen. Stellen wij ons namelijk een plaat met twee kleine gaatjes voor, en daarop een stroom electronen gericht, dan gebeurt er iets geheel anders dan bij een plaat met slechts één gaatje het geval was. De leer van het licht vertelt ons, wat er gebeurt, wanneer golven door twee zulke gaatjes

gaan; in plaats van één licht vlek op het scherm ontstaat er een reeks afwisselende lichte en donkere strepen, daar de afstanden van een willekeurig punt van het scherm tot de gaatjes verschillend zijn. De lichte strepen gaven de plaatsen aan, waar de golven elkaar versterkt hebben, de zwarte, waar verzwakking is opgetreden. Sluiten wij een van de gaatjes af, dan verdwijnen de interferentiestrepen en blijft slechts de gewone buigingsvlek over. Wij zien dus, dat een beeld op een photographische plaat in hooge mate zal veranderen, wanneer men twee gaatjes in plaats van één opening in het scherm maakt. Wanneer wij nu electronen voor deze proef gebruiken, zal het resultaat hetzelfde zijn als hetwelk gewoon licht opleverde, aangezien immers ook electronen in staat zijn, interferentieverschijnselen te voorschijn te roepen, zoodat men ook nu op een photographische plaat een beeld krijgt, dat uit afwisselend lichte en donkere strepen bestaat. Indien men nu werkelijk in staat zou zijn, zoowel de snelheid als de plaats van een electron, vóór het de geperforeerde plaat passeert, met onbegrensde nauwkeurigheid te kennen, zou men causaal kunnen bepalen, door welke der gaatjes het zijn weg zou kiezen en op welke plaats het de plaat zou bereiken. Alle electronen, waarvan wij vastgesteld hebben, dat zij bijvoorbeeld door het onderste gaatje zullen gaan, zouden er uit den aard der zaak geen hinder van ondervinden als het bovenste afgedekt werd. Maar de ervaring leerde juist, dat, wanneer het bovenste gaatje afgedekt wordt, de electronen, die door het onderste gaan, de plaat op heel andere plaatsen zullen bereiken dan eerst, aangezien de electronen in dat geval slechts één buigingsvlek geven en geen strepen. Aangezien het echter met het gezond verstand strijdig zou

zijn, aan te nemen, dat electronen, waarvan wij weten, dat zij door het onderste gaatje gaan, zouden kunnen bemerken, of het andere al dan niet afgedekt is, blijft er geen andere mogelijkheid over dan te erkennen, dat de besproken verschijnselen niet behandeld kunnen worden op de gebruikelijke wijze, die slechts geldigheid bezit, wanneer het gaat om verschijnselen, waarbij de wisselwerking tusschen object en meetinstrument geen rol speelt en het gangbare begrip van oorzaak en gevolg dus gebruikt kan worden. Voor wij overgaan naar de meer positieve resultaten der atoommechanica, is het misschien dienstig, deze ervaring te bezien in het licht van den ouden strijd in de philosophie tusschen deterministen en indeterministen. De eersten zijn, zooals bekend, de overtuiging toegedaan, dat iedere toekomstige toestand causaal te bepalen is, wanneer men alle oorzaken kent, die op een bepaald tijdstip werkzaam zijn. Het indeterminisme daarentegen ontkent de mogelijkheid van zulk een voorspelling, aangezien het rekening houdt met een eventueel ingrijpen van oncontroleerbare machten. De meeste natuurkundigen behoorden vroeger, wat hun wijsgeerige opvattingen betreft, wel tot het determinisme, aangezien de heele klassieke mechanica één groot voorbeeld was van de juistheid der deterministische beginselen. Maar door de resultaten der quantentheorie is de toestand veranderd, echter niet in dien zin, dat de natuurkundigen over de geheele lijn indeterministen zouden zijn geworden, want een dergelijke houding zou ten eenen male de mogelijkheid buitensluiten, de physica te beoefenen. Het nieuwe inzicht beteekent slechts de erkenning, dat het principieel onmogelijk is, al de factoren, die op een zeker tijdstip werkzaam zijn en den physieken toestand be-

palen, volkomen te kennen, hetgeen wil zeggen, dat de eischen van het determinisme, ten minste wat de wereld der atomen betreft, niet te vervullen zijn. Dit beteekent allerminst, dat de natuurkunde minder exact is geworden, doch slechts, dat men te rekenen heeft met wetmatigheden van een nieuw karakter, die buiten de grenzen der causaliteit vallen, doch die haar natuurlijke plaats vinden binnen het ruimere kader der natuurbeschrijving, dat overeenstemt met het complementariteitsstandpunt.

Laatste triomfen der atoommechanica

In tegenstelling tot de vroegere voorstellingen, toen men de stationnaire toestanden der atomen aanschouwelijk maakte met behulp der electronenbanen, brengen de bovengenoemde resultaten mede, dat men, evenals met de interferentie der electronen, ook binnen het atoom slechts van de waarschijnlijkheid kan spreken, electronen op bepaalde plaatsen aan te treffen. Bij de interferentieproeven is deze waarschijnlijkheid beschreven bij de De Broglie-golven. Schrödinger nu slaagde er in, de „Schrödingervergelijking" te vinden, die onder alle omstandigheden de uitbreiding in ruimte en tijd van deze „golven" beheerscht, en het bleek, dat deze vergelijking het bestaan van de stationnaire toestanden in de atomen kon verantwoorden. Voor deze toestanden kan het mogelijk zijn, dat de waarschijnlijkheid ten aanzien van de plaats der betreffende electronen niet met den tijd verandert. Gaat men na, of de Schrödingervergelijking zulke stationnaire oplossingen geeft, dan vindt men, dat er voor ieder atoom een geheele reeks bestaat, die dan toegeschreven kan worden aan de verschillende stationnaire toestanden in het atoom. Uit de vergelijking is voorts de energie te berekenen van

het atoom in deze toestanden, welke blijkt overeen te stemmen met de waarden, gevonden uit de spectra en uit Bohrs tweede postulaat. Zelfs voor meer gecompliceerde atoomsystemen was het mogelijk, de berekeningen uit te voeren, die in alle gevallen keurig bleken overeen te stemmen met de resultaten der experimenten.

In de Schrödingervergelijking was intusschen geen rekening gehouden met de spin der electronen, zoodat men uit deze vergelijking niet al de energiewaarden vindt, die de microstructuur in de spectra geeft. Van een zuiver theoretisch standpunt had de vergelijking van Schrödinger bovendien de fout, dat zij geen rekening hield met de correcties, die noodig zouden zijn op grond van Einsteins relativiteitstheorie, gezien de groote snelheden, die de electronen in een atoom bezitten. Volgens deze theorie, waarvan de bespreking buiten het kader van dit boek valt, weegt een electron namelijk schijnbaar niet steeds evenveel, doch wordt het zwaarder, naar mate zijn snelheid toeneemt. Voor langzame electronen speelt de aldus ontstane fout geen rol, maar zoo spoedig de snelheid van een electron die van het licht begint te naderen, neemt de massa van een electron zeer sterk toe, om oneindig groot te worden, wanneer de lichtsnelheid bereikt wordt.

De Engelschman Dirac slaagde er nu in, twee vliegen in één klap te slaan, door voor de De Broglie-golven een nieuwe vergelijking op te stellen, die niet slechts rekening hield met de correcties, noodig op grond van de relativiteitstheorie, maar ook nauwkeurig het aantal stationnaire oplossingen gaf als men op grond van de spin der electronen zou mogen verwachten. Daarmede was op de theoretische behandeling van de atoommechanica de kroon gezet. Slechts één oogenschijnlijk

bezwaar kleefde aan Diracs theorie, namelijk, dat zij, behalve de reeks oplossingen, die overeenkwamen met de experimenteel gevonden stationnaire toestanden, nog een, niet verwachte, tweede reeks oplossingen gaf, correspondeerende met een reeks stationnaire toestanden, waarin de electronen zich moesten gedragen, alsof zij een negatieve bewegingsenergie en dus ook een negatieve massa bezaten. Een negatieve massa zou intusschen beteekenen, dat de electronen, wanneer een kracht op ze inwerkt, zich tegen de richting dier kracht in zouden bewegen, welk gedrag een theoreticus aanleiding gaf, ze schertsend „ezelelectronen" te noemen. De experimentators hadden intusschen zulk een gedrag nimmer waargenomen, doch dat zou misschien kunnen komen, doordat electronen nooit in deze toestanden optraden. De moeilijkheid was nu, dat men volgens Bohrs tweede postulaat zou kunnen verwachten, dat er energiesprongen tusschen beide groepen van stationnaire toestanden plaatsvonden, waarbij dan een gewoon volgzaam electron in zulk een „ezelelectron" zou veranderen. Men werd dus voor de keuze gesteld, òf Diracs theorie geheel te verwerpen, hetgeen zeer jammer zou zijn, omdat zij overigens zulke uitstekende resultaten gaf, òfwel de oorzaak te vinden, waardoor deze energiesprongen niet plaatshadden. Dirac nam daartoe aan, dat alle negatieve stationnaire toestanden normaal door electronen bezet waren, zoodat er bij wijze van spreken, geen plaats was voor meerdere, op dezelfde wijze als de verschillende electronengroepen in de zwaardere atomen slechts het door het Pauli-verbod begrensde aantal electronen kunnen bevatten. Volgens deze voorstellingen zou de ledige ruimte gevuld zijn met oneindig vele electronen met negatieve energie. Aangezien

echter de ledige ruimte electrisch neutraal is, en een energie-inhoud gelijk nul bezit, dient men aan te nemen, dat het principieel onmogelijk is, deze „ezelelectronen" waar te nemen. Wanneer men evenwel op de een of andere wijze een van deze electronen in het positieve energiegebied der normale electronen zou kunnen brengen, zou zoowel de mogelijkheid geschapen worden, dit electron waar te nemen als het daardoor veroorzaakte „gat" in het negatieve energiegebied. Zulk een gat zou namelijk dezelfde eigenschappen bezitten als een electron met positieve lading en met positieve energie zou hebben, aangezien men, om den voor de ledige ruimte normalen toestand terug te krijgen, een negatief geladen electron met negatieve energie zou moeten toevoegen. Het gat zou zich in overeenstemming hiermede onder invloed van electrische of magnetische krachten bewegen als een positief geladen electron zou doen, dat wil zeggen, in tegengestelde richting dan gewone electronen. Iederen keer, dat wij er in slagen, door toevoegen van energie een electron van een toestand van negatieve energie te brengen in één met positieve, zou dus een partikelpaar geschapen worden, bestaande uit een positief en een negatief geladen electron met hetzelfde gewicht. Omgekeerd zou de aanwezigheid van een gat in het negatieve energiegebied, dat wil zeggen van een positief geladen electron, de mogelijkheid van den overgang medebrengen van een electron uit het positieve energiegebied naar het gat, waarbij de bevrijding van een energiequant te wachten is. De quant zou zich manifesteeren als een electromagnetische straling, evenals Röntgenstraling ontstaat, wanneer men een van de binnenste electronen van een atoom vrij heeft gemaakt, en ook een meer naar buiten

gelegen electron zijn plaats inneemt. Bij dit proces, het vullen van het gat, zouden dan een positief en een negatief electron ophouden te bestaan.

Deze merkwaardige consequentie van Diracs theorie werd door de natuurkundigen zeer sceptisch ontvangen, deels op grond van de eenigszins fantastische voorstelling, dat de ruimte gevuld zou zijn met „ezel-electronen", waarvan de aanwezigheid niet te constateeren viel, doch voornamelijk op grond van het feit, dat men nooit electronen met een positieve lading had waargenomen. Terwijl men bij alle vroegere beschouwingen over den opbouw der stof het aantal stoffelijke deeltjes als constant beschouwd had, zouden volgens deze theorie onder bepaalde omstandigheden stoffelijke deeltjes teniet kunnen gaan onder vorming van electromagnetische straling, of, omgekeerd, gevormd kunnen worden onder het verdwijnen van dusdanige straling. Volgens de theorie is het mogelijk, te berekenen, hoe vaak en onder welke omstandigheden zulk een scheppings- of vernietigingsproces plaats zou kunnen vinden, en hoeveel energie daarbij verdwijnt, respectievelijk ontstaat. Zulke omzettingen blijken slechts uiterst zelden voor te komen en de gevormde energie geweldig groot te zijn, namelijk minstens 1,1 millioen electron-Volt. Deze twee omstandigheden maken uit den aard der zaak een experimenteele bekrachtiging der processen zeer moeilijk.

Overigens had reeds Einstein in zijn relativiteitstheorie aangetoond, dat iedere hoeveelheid stof met massa m een hoeveelheid energie E bevat, bepaald door de formule $E = m < c^2$, waarin c de voortplantingssnelheid van het licht aangeeft, zonder dat nochtans zijn theorie de mogelijkheid uitsprak, deze energie vrij te maken. Daar Diracs theorie juist opgesteld was in overeenstemming met de relativiteitstheorie, is de genoemde energiewaarde van minstens 1,1 millioen electron-Volt dezelfde als die men vindt, door in

bovenstaande formule m te substitueeren door de gezamenlijke massa van het partikelpaar, dat wil zeggen het dubbele van de massa der electronen.

Diracs theorie, hoe fantastisch zij dan ook mocht lijken, werd een paar jaar later (1932) bevestigd door de ontdekking van het zoogenaamde positron, dat alle eigenschappen bleek te bezitten die de theorie eischte. Op deze ontdekking, die een fraai voorbeeld is, hoe theoretische en experimenteele physica elkaar aanvullen, zullen wij naderhand nog uitvoeriger terugkomen.

Het tijdstip der physica, dat wij in dit hoofdstuk besproken hebben, kenmerkt zich daardoor, dat het een groot aantal experimenteele feiten omvatte, die in onderling verband verklaard konden worden, hetgeen leidde tot een diepgaand inzicht in de structuur der atomen. Toch was het bij wijze van spreken slechts de „buitenkant" der atomen, dien men nauwkeuriger leerde kennen: zoowel de theoretische als de experimenteele onderzoekingen hielden zich voornamelijk bezig met het electronensysteem der atomen en de daarmede samenhangende physische en chemische eigenschappen. Onze kennis van den bouw van dit electronensysteem en van de nieuwe wetten, die de bewegingen der electronen in het atoom beheerschen, had daarbij een zeer hoogen graad van volmaaktheid bereikt, terwijl deze kennis zich ook tot de „binnenste" electronen uitstrekte. Wat zich binnen deze electronen bevond, de zoogenaamde atoomkern, lag voor het grootste gedeelte nog braak voor het onderzoek.

III

HET RAADSEL DER ATOOMKERNEN – HET TIJDPERK DER NIEUWE ONTDEKKINGEN

In de allerlaatste jaren hebben wij een periode beleefd, die wat betreft groote nieuwe ontdekkingen niet achterstaat bij het tijdperk der groote ontdekkingen omtrent de eeuwwisseling. Deze opbloei heeft de ontwikkeling medegebracht van een geheel nieuw hoofdstuk in de natuurkunde: de atoomkernphysica, die in slechts enkele jaren onze kennis aangaande de kernen der atomen zóó uitgebreid heeft, dat het nu reeds mogelijk is, een min of meer afgeronde beschrijving te geven van haar eigenschappen, hoewel natuurlijk ieder oogenblik nieuwe verrassingen verwacht kunnen worden.

Isotopen

Onder de zeer verschillende physische en chemische eigenschappen der elementen zijn er slechts twee, waarvan aangenomen mag worden, dat zij haar ontstaan onmiddellijk in de kernen der atomen vinden, namelijk het gewicht en de radio-actieve eigenschappen. Laten wij beginnen met het gewicht.

Naast de chemische methode ter bepaling van de verhouding tusschen de gewichten der atomen van de

elementen, heeft, zooals wij reeds gezien hebben op pagina 32, ook de natuurkunde een werkwijze opgeleverd ter bepaling der atoomgewichten door directe afweging tegen magnetische en electrische krachten. Deze, oorspronkelijk van Thomson afkomstige, werkwijze werd door den Engelschman Aston verder uitgewerkt tot een precisiemethode, toen hij het apparaat construeerde, waarvan figuur 24, Plaat VI een afbeelding geeft, de zoogenaamde massaspectrograaf. In dit toestel worden positief geladen ionen van de stof, die men wil onderzoeken, voortgebracht met behulp van electrische ontladingen van verschillenden aard. Deze ionen worden door een luchtledige ruimte langs electrisch geladen afbuigingselectroden tusschen de polen van een electromagneet geleid, waarbij de ionen van hun rechte baan worden afgebogen, minder naar mate zij zwaarder zijn. Door een juiste afstemming van de spanning der afbuigingselectroden en de sterkte van den magneet bereikte Aston, dat alle ionen met hetzelfde gewicht na de afbuiging in éénzelfde brandpunt vereenigd werden, zoodat een scherpe vlek te voorschijn geroepen werd op een, op de juiste plaats aangebrachte, photographische plaat. Met behulp van deze vlekken nu kan de grootte van de afbuiging berekend worden, waarna het mogelijk is, bij een voldoende kennis van de afbuigende electrische en magnetische krachten, het gewicht der ionen te berekenen, en daarmede dat der atomen.

De eerste stof, waarmede Aston experimenteerde in zijn massaspectrograaf was het edelgas neon, waarvan het atoomgewicht 20,2 bedraagt, zooals volgens andere methodes bepaald was. Voor dit gas had reeds Thomson met zijn veel eenvoudiger apparaat twee verschillende afbuigingen gevonden, overeenkomende met de

atoomgewichten 20 en 22, en Aston vond eveneens twee vlekken, overeenkomende met de gewichten 20 en 22, en niet, zooals men zou verwachten, één met 20,2. Dit was een hoogst merkwaardige waarneming, aangezien zij aantoonde, dat de neonatomen niet, zooals tot dan toe aangenomen was, alle hetzelfde atoomgewicht bezitten, maar dat het gas neon uit twee soorten neonatomen bestaat met de gewichten 20 en 22. Het experiment liet ook toe, uit de mate van zwartkleuring der vlekken de verhouding van de aantallen der beide soorten atomen te schatten; het bleek, dat er ongeveer tien maal zooveel atomen met het gewicht 20 als met het gewicht 22 waren. De vroeger gebruikelijke methode van atoomgewichtsbepaling, die voor neon een waarde van 20,2 had gevonden, had dus slechts een gemiddelde doen kennen:

$$\frac{20 \times 10 + 21 \times 1}{10 \times 1} = 20{,}2$$

Aston onderzocht toen een lange reeks andere stoffen, en vond overeenkomstige resultaten. Voor chloor bijvoorbeeld, waarvan het atoomgewicht volgens opgave der chemie 35,47 bedraagt, vond hij de aanwezigheid van twee soorten chlooratomen met de gewichten 35,0 en 37,0, voorkomende in een verhouding 3 : 1, hetgeen weer het gemiddelde

$$\frac{25 \times 3 + 37 \times 1}{3 \times 1} = 35{,}5$$

oplevert. Allicht rijst de vraag, hoe het mogelijk is, dat deze verschijnselen tusschen de atomen van eenzelfde element niet reeds eerder ontdekt waren. Het antwoord is gemakkelijk te geven, nu wij weten, dat het atoomgewicht een eigenschap van de kern is, terwijl de andere eigenschappen bepaald worden door het aantal electro-

nen (het atoomnummer), dat voor alle atomen van een element hetzelfde is, zooals onder andere uit de Röntgenspectra blijkt.

Door Astons ontdekkingen werd dus vastgesteld, dat er atomen bestaan met identieke physische en chemische eigenschappen, doch met verschillend gewicht. Zulke atomen kunnen dus in het periodieke systeem de plaats ontvangen, die met hun atoomnummer overeenkomt, onafhankelijk van het atoomgewicht. De elementen, welker in gewicht verschillende atomen op dezelfde plaats komen, noemt men isotopen.

Het fraaiste van Astons ontdekking was intusschen, dat de isotopen steeds geheele atoomgewichten bleken te bezitten: elk atoomgewicht was dus een geheel veelvoud van het gewicht van een waterstofatoom. Reeds vele jaren vroeger had men er aandacht aan geschonken, dat de atoomgewichten van vele elementen opvallend kort bij de geheele getallen liggen, wanneer het gewicht van een waterstofatoom als eenheid werd aangenomen. stikstof had bijvoorbeeld het atoomgewicht 14,0 en zuurstof 16,0, maar aangezien de gewichten van verscheidene andere atomen gebroken getallen aangaven, chloor bijvoorbeeld 35,5, was men gewoonlijk geneigd, de geheele getallen als toevalligheden te beschouwen. De onderzoekingen van Aston echter toonden aan, dat elementen met geheele atoomgewichten in den regel slechts één isotoop bezitten, zoodat men zeggen kan, dat het voornaamste resultaat zijner experimenten is, aangetoond te hebben, dat de kernen van alle atomen een geheel aantal malen zoo veel wegen als een waterstofkern, wanneer men het, in verhouding tot de kerngewichten, uiterst geringe gewicht der electronen verwaarloost. Het lag nu voor de hand, aan te nemen,

dat de kernen van alle atomen opgebouwd zijn uit een geheel aantal deeltjes met hetzelfde gewicht als een waterstofkern. Toch mag men niet zonder meer aannemen, dat bijvoorbeeld de neonkern eenvoudig 20 waterstofkernen bevat, aangezien zij dan ook 20 positieve ladingen zou moeten bezitten, terwijl experimenteel blijkt, dat de kernlading van neon slechts 10 bedraagt. Een tijdlang nam men ter verklaring aan, dat ook de kern electronen kon bevatten, die een deel der lading neutraliseerden zonder het gewicht wezenlijk te verhoogen. Deze hypothese heeft men in den laatsten tijd echter verlaten, aangezien men andere en betere verklaringsmogelijkheden heeft ontdekt.

Practisch alle elementen zijn thans massaspectrografisch onderzocht, zoodat men de verschillende isotopen en de verhoudingen harer aantallen nauwkeurig kent. De ongeveer 90 bekende elementen blijken te bestaan uit totaal circa 250 verschillende isotopen, waarvan enkele in slechts zeer geringe hoeveelheden voorkomen. Om een bepaald atoom volledig te karakteriseeren, is het dus niet meer voldoende het atoomnummer op te geven: men moet ook aanduiden, met welke isotoop men te doen heeft. Zoo is het gebruik in de natuurkunde ontstaan, bij de aanduiding van een bepaalde isotoop zoowel het atoomnummer als het atoomgewicht bij een chemisch symbool op te geven; beide er vóór, het nummer boven en het gewicht onder. De straks genoemde voorbeelden schrijft men dus:

$$^{20}_{10}\mathrm{Ne}\ \text{en}\ ^{22}_{10}\mathrm{Ne};\quad ^{35}_{17}\mathrm{Cl}\ \text{en}\ ^{37}_{17}\mathrm{Cl}$$

Een fraai voorbeeld van een massaspectrogram ziet men in figuur 25, Plaat VII, een opname van zink, omvattende de isotopen 64, 66, 67, 68 en 70. De vier

isotopen met even atoomgewicht ziet men liggen op gelijke afstanden van elkaar, terwijl de oneven isotoop 67 midden tusschen 66 en 68 ligt.

Bijzonder belang bezit de zware waterstofisotoop, die in 1932 door den Amerikaan Urey en zijn medewerkers werd gevonden. Hoewel men er bij massaspectrografische onderzoekingen nooit rekening mee had gehouden, dat waterstof meerdere isotopen zou bezitten, vermoedde men toch wel, dat zij zouden bestaan, zij het dan in zeer geringe hoeveelheden. Urey trachtte met een optisch-spectroscopische methode een zware waterstofisotoop te vinden; men kon verwachten, dat de spectraallijnen van zulk een isotoop als gevolg van de grootere massa der kern een weinig verschoven zouden liggen ten opzichte van de gewone waterstoflijnen. Zulk een verschuiving had men reeds eerder gevonden in het spectrum van het heliumion (zie pagina 79), terwijl Bohr's theorie over de constante van Rydberg deze verschuiving kan verklaren als een gevolg van het grootere gewicht der heliumkern. Door toepassing van Bohrs formule kon Urey van te voren nauwkeurig de verschuiving der spectraallijnen, waartoe een waterstofisotoop met massa 2 aanleiding zou geven, berekenen. Zijn proef bestond uit het photographeeren van het spectrum van gewone waterstof, doch met een dusdanig lange belichting, dat zelfs een uiterst kleine hoeveelheid zware waterstof zich kenbaar zou maken. Bij een belichtingstijd, die ongeveer 4000 maal zoo lang was als noodig om de sterkste lijnen op de plaat te krijgen, slaagde hij er in, zwakke spectraallijnen vast te leggen, die met de berekende golflengte overeenstemden. Hieruit concludeerde Urey, dat gewone waterstof, behalve de normale atomen met atoom-

gewicht 1, ook atomen met gewicht 2 bevat, doch slechts in de verhouding 1 : 4000. Figuur 26 van Plaat VII brengt een van Urey's oorspronkelijke opnamen in beeld. Volgens de zooeven genoemde aanduidingsmethode is het symbool voor de zware waterstofisotoop $^{2}_{1}$ H, terwijl de gewone isotoop het teeken $^{1}_{1}$ H bezit.

Terwijl de isotopen der zwaardere elementen er door gekenmerkt worden, dat het verschil tusschen de atoomgewichten der onderscheidene isotopen gering is in verhouding tot het atoomgewicht zelf, is de toestand geheel anders bij de waterstof, waar de zware isotoop het dubbele weegt van de lichte. Ondanks het feit, dat deze beide waterstofatomen hetzelfde aantal electronen om hun kern hebben, namelijk één, mocht men verwachten, dat in dit speciale geval de beide isotopen een duidelijk verschil in physische en chemische eigenschappen zouden vertoonen, zoodat men spoedig pogingen in het werk stelde, de beide soorten waterstof van elkaar te scheiden. Ten einde deze scheiding te bewerkstelligen, zou men een verdampingsmethode kunnen toepassen, aangezien door het groote gewichtsverschil tusschen de isotopen de lichte atomen het eerst zullen verdampen. Urey paste zulk een methode inderdaad toe: hij liet een hoeveelheid vloeibare waterstof verdampen op een kleine hoeveelheid na en deze bleek inderdaad de zware waterstof in een groote concentratie te bevatten. Deze methode bezat echter vele practische bezwaren, zoodat het een groote verbetering beteekende, toen men op de gedachte kwam, langs electrolytischen weg te werk te gaan.

Volgens de voorstellingen, die de Zweed Arrhenius ontwikkeld heeft over den doorgang van een electrischen stroom door waterige oplossingen van verschillende chemische verbindingen, geschiedt de overbrenging van den stroom tusschen de electroden in de vloeistof door electrisch geladen ionen, die ontstaan door dissociatie der moleculen, wanneer de stof in het water wordt opgelost. Bij electrolyse van de waterige oplossing van een zuur geven de waterstofionen bij de kathode gewoonlijk hun lading af, om in den vorm van gewone waterstof als gasbellen te ontwijken. Daar uit proeven was gebleken, dat de snelheid van de lichte ionen door het electrolyt het grootst was, kan men verwachten, dat de atomen van de lichte waterstofisotoop het eerst zullen ontwijken bij de electrolyse. De juistheid hiervan bleek dadelijk, bij een onderzoek van oud accumulatorzuur, waardoor de stroom langen tijd heen gegaan was: het bevatte zware waterstof in vrij hooge concentratie.

Volgens deze methode wordt in de laatste jaren zware waterstof technisch bereid bij de maatschappij „Norsk Hydro", die over groote hoeveelheden electrische energie, afkomstig van watervallen, beschikt: zij bereidt groote quantiteiten zware waterstof in den vorm van water, waarvan elk molecule twee atomen zware waterstof bevat.

Zooals te verwachten was, bleek dit zoogenaamde zware water eigenschappen te bezitten, die aanmerkelijk afwijken van die van gewoon water; het bevriest bijvoorbeeld reeds bij 3,8° C. en kookt eerst bij 101,4° C., terwijl het soortelijk gewicht 1,1 bedraagt. De ontdekking van de zware waterstof en het zware water was een van de practische resultaten, waarop de moderne atoomphysica kan bogen. Behalve van groote beteekenis voor de chemie, bleek het zware water onder andere ook belangrijk voor biologische onderzoekingen. Het maakt het bijvoorbeeld mogelijk, na te gaan, hoe snel water opgenomen wordt door en verdeeld in levende organismen.

De taak, de isotopen van andere elementen van elkaar te scheiden, is aanzienlijk moeilijker, aangezien deze gemeenlijk niet veel in atoomgewicht van elkaar ver-

schillen. Men is dus aangewezen op methodes, die gevoelig genoeg zijn voor kleine atoomgewichtsverschillen. Behalve bij verdamping en electrolyse zal een verschil in atoomgewicht zich ook openbaren bij de diffusie van gassen door poreuze stoffen, aangezien de lichte atomen daar vlugger door heen gaan dan de zware. De Duitscher G. Hertz heeft van dit beginsel gebruik gemaakt en onder andere de beide isotopen

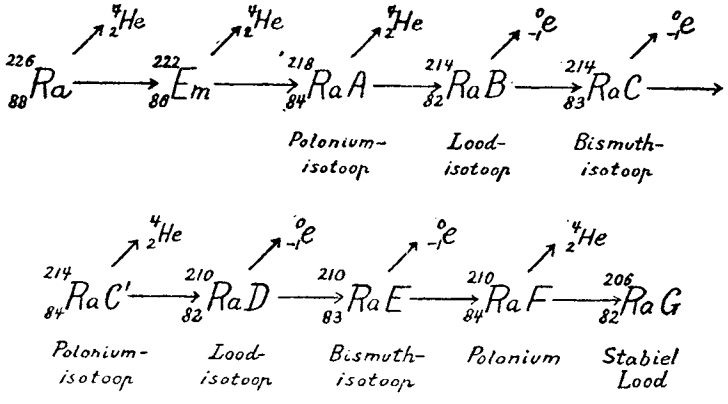


Fig. 27. De stamboom der radiumfamilie onder vermelding van het atoomgewicht en de plaats in het periodieke systeem der afzonderlijke leden

van neon volkomen van elkaar gescheiden. Voorts kan nog vermeld worden, dat in verschillende physische laboratoria over de geheele wereld gewerkt wordt met groote massaspectrografen volgens het beginsel van Aston, om isotopen in weegbare hoeveelheden van elkaar te scheiden. In het gunstigste geval bereidt men thans zuivere isotopen in hoeveelheden van ongeveer 1 milligram per dag.

De lezer zal misschien de opmerking gemaakt hebben, dat de ontdekking der isotopen de mogelijkheid

geopend heeft, den verschillenden radio-actieve stoffen, die in de radio-actieve families voorkomen, een plaats te verschaffen in het periodieke systeem, aangezien de afzonderlijke bladen in het kaartsysteem der elementen meer plaats boden dan men aanvankelijk meende. Ten einde na te gaan, hoe bijvoorbeeld de radiumfamilie ondergebracht kan worden in het periodieke systeem, zullen wij nogmaals den stamboom opstellen, ditmaal onder vermelding van het atoomgewicht, zoowel als van het atoomnummer der verschillende isotopen; zie figuur 27. Ook de α- en β-deeltjes hebben wij van teekens volgens de gebruikelijke methode voorzien, aangezien een α-deeltje, dat immers een heliumkern met gewicht 4 en lading 2 is, voor te stellen is door ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, en een β-deeltje, dat een electron is met een te verwaarloozen gewicht en een negatieve lading, door ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$. Men kan thans gemakkelijk de juistheid van ieder lid controleeren, aangezien voor ieder element in de desintegratiereeks geldt, dat zijn gewicht en lading overeenstemmen met die van het moederelement, verminderd met gewicht en lading der uitgezonden deeltjes. Slechts moet men er aan denken, dat het aftrekken van de negatieve lading van een electron overeenkomt met het vermeerderen van de kernlading met 1. Zooals men ziet, treden in de reeks twee stoffen nummer 83 op, die dus beide isotopen van bismuth zijn, van elkaar en van het gewone bismuth onderscheiden, deels door haar verschillende radio-actieve eigenschappen (straling en halveeringstijd), deels door haar atoomgewicht, respectievelijk 214 en 210 bedragende, terwijl dat van gewoon bismuth 209 bedraagt. Voorts komen er drie loodisotopen nummer 82 voor met de gewichten 214, 210 en 206,

waarvan het laatstgenoemde het niet meer radio-actief zijnde eindproduct is van de desintegratiereeks.

In totaal zenden er van de radiumfamilie 5 leden α-deeltjes uit en 4 β-deeltjes, vóór een radiumatoom overgegaan is in een atoom stabiel lood. Behalve de radiumfamilie kent men nog twee radio-actieve families: de actinium- en de thorium-familie, waarvan de verwantschap volkomen verklaard is, en die beide als eindproduct een stabiele loodisotoop hebben. Deze drie eindproducten bezitten de atoomgewichten 206, 207 en 208, precies dezelfde isotopen, die men met massaspectrografische onderzoekingen van gewoon in de natuur voorkomend lood vindt. Wij hebben thans orde gebracht in de laatste bladen van het kaartsysteem van het periodieke systeem der elementen, zooals wij reeds eerder toegezegd hadden te zullen doen. Interessant is het nog, te vermelden, dat de Engelschman Soddy reeds in 1910 het bestaan van isotopen der radio-actieve stoffen had aangenomen, met het speciale doel, ze onder te kunnen brengen in het periodieke systeem.

Terwijl men vroeger slechts 90 verschillende soorten atomen kende, namelijk evenveel als het aantal elementen bedroeg, kent men er thans, na te ontdekking der isotopen, evenvele als er isotopen bestaan, dat wil zeggen, ongeveer 250 voor de stabiele grondstoffen, vermeerderd met circa 50 van de radio-actieve stoffen.

Kunstmatige verandering der elementen

Zooals reeds vermeld is, leidde de ontdekking van isotopen tot de veronderstelling, dat alle atoomkernen opgebouwd waren uit een geheel aantal kleine deeltjes met hetzelfde gewicht als de waterstofkern, doch dieper inzicht kon langs dien weg niet verkregen worden. Bij

radio-actieve processen worden wel is waar deeltjes uitgezonden door de kernen in den vorm van α- en β-deeltjes, doch dit was evenmin voldoende, den bouw der kernen te verklaren. De allerbeste methode ware natuurlijk, te trachten, de kern te verbrijzelen, zoodat men de afzonderlijke deeltjes zou kunnen onderzoeken, doch ook dit is geen gemakkelijke taak, ten eerste omdat de atoomkernen ten gevolge harer kleinheid moeilijk te treffen zijn en ten tweede, omdat voor die verbrijzeling zeer veel kracht noodig is.

Bij Rutherfords beroemde bewijs van het bestaan van atoomkernen (zie pagina 61 e.v.) door het beschieten met α-deeltjes, werden de minimale afmetingen der atoomkernen juist vastgesteld door de zeldzaamheid, waarmee men er in slaagde, een kern te treffen. Ten aanzien van de energie, benoodigd om een kern stuk te slaan, dienen wij ons eerst te herinneren, dat er meer energie noodig is naar mate de deelen van het atoom, waarop men wil inwerken, dieper gelegen zijn. Ten einde een buitenste electron van een atoom los te maken, is, zooals gebleken is uit Bohrs atoomtheorie en de proeven van Franck en Hertz, een energie van ongeveer 10 electron-Volt voldoende. Gaat het echter om de binnenste electronen van een atoom, zooals die beinvloed moeten worden voor het te voorschijn roepen van Röntgenstraling, dan heeft men reeds 10.000 tot 100.000 Volt noodig. En om de atoomkern te beinvloeden blijken ten slotte verscheidene millioenen electron-Volts noodig te zijn. Om wat meer inzicht in deze omstandigheid te verkrijgen, zullen wij een nader onderzoek instellen naar de hoeveelheid energie, vervat in de straling der radio-actieve stoffen.

Magnetische en electrische afbuigingsproeven had-

den, wat betreft de α- en β-deeltjes, niet alleen haar aard volkomen duidelijk gemaakt, maar ook nauwkeurige gegevens verschaft aangaande haar energie en snelheid. De snelheden, die men vindt voor α-deeltjes, ligt tusschen 14.000 en 20.000 km/sec., maar de daarmede overeenkomende bewegingsenergie bedraagt tengevolge der geringere massa der electronen „slechts" 2–3 millioen electron-Volt hoogstens.

Wanneer men in de practijk de energie der α-deeltjes wil meten, bepaalt men zich thans tot het meten van den afstand, waarover zij in de lucht kunnen doordringen, aangezien men in den loop der tijden zoovele afbuigingsproeven verricht heeft, dat men nauwkeurig weet, hoever een α-deeltje met willekeurige bewegingsenergie in de lucht kan doordringen. De α-deeltjes van Ra bij voorbeeld bezitten een doordringingsafstand van 3,8 cm bij een energie van 5,3 electron-Volt; die van Ra C^1 van 6,9 cm bij 7,7 millioen electron-Volt.

Ook γ-stralen kunnen gegevens verschaffen over de hoeveelheden energie van de kernen der radio-actieve elementen. De γ-stralen zijn niet van corpusculairen aard, doch blijken een electromagnetische straling van uiterst kleine golflengte te zijn, die optreedt als begeleidingsverschijnsel bij de uitzending van deeltjes, maar die op zichzelf niet haar oorsprong vindt in de desintegratie der radio-actieve elementen. Door middel van proeven met interferentie in kristallen heeft men volgens dezelfde methode als met Röntgenstralen is toegepast, de golflengte van eenige γ-stralen kunnen meten. Deze werkwijze laat ons echter in den steek voor golven, korter dan 0,3 Å, zoodat men voor verdere golflengtemetingen aangewezen was op indirecte meetmethodes.

Een van deze bestond uit het te voorschijn roepen van een photo-electrisch effect door middel van γ-stralen (vergelijk pagina 54), waarbij electroden worden vrijgemaakt, die de stralingsenergie der γ-stralen hebben overgenomen, zoodat die dan gemeten kan worden. Daar deze energie volgens Einsteins verklaring van het photo-electrisch effect omgezet wordt in quanten ter grootte van het product van Planckschc constante en frequentie, is het gemakkelijk, daaruit de golflengte te berekenen. Volgens dergelijke methodes heeft men een geheele γ-stralen-spectroscopie gegrondvest, door de afzonderlijke „spectraallijnen" der verschillende radio-actieve elementen te meten.

Men heeft golflengten gevonden ten bedrage van 0.004 Å, hetgeen overeenkomt met energiequanten van 3 millioen electron-Volt. Wanneer de kernen der radio-actieve elementen in staat zijn, quanten met een energie van 3 millioen Volt uit te zenden, moeten zij onder bepaalde omstandigheden dus over minstens even groote hoeveelheden energie beschikken.

Al de drie straalsoorten der radio-actieve elementen toonen ons dus, welke ontzaglijke hoeveelheden energie in de atoomkernen voorkomen; in ieder geval in die der radio-actieve stoffen. Daardoor kunnen wij ons ook een beeld vormen van de hoeveelheden energie, waarover men moet beschikken, om atoomkernen te verbrijzelen, en de gedachte, voor de kernsplitsing van andere kernen, de straling van radio-actieve elementen te gebruiken, ligt voor de hand. Het blijkt evenwel, dat β-deeltjes niet gebruikt kunnen worden, daar zij ten gevolge van hun gering gewicht te gemakkelijk afgebogen worden door de electrische krachten in het atoom, zelfs bij energie-inhouden van verscheidene millioenen Volt. Daarentegen zijn de zware α-deeltjes in staat, zware slagen toe te brengen, ook al is hun hoeveelheid energie in werkelijkheid niet grooter dan die der β-deeltjes.

Het was weer Rutherford, die den beslissenden stap deed: in 1919 slaagde hij er in, een kernsplitsing teweeg

te brengen door α-deeltjes als projectielen te gebruiken. Hij zond deze daartoe in een vat, gevuld met zorgvuldig van ieder spoor waterstof bevrijde stikstof onder een druk van 1 atmosfeer. Door middel van een zinksulfidescherm mat hij nu den afstand, waarover de α-deeltjes in het gas konden doordringen; voor het gebruikte praeparaat bedroeg deze ongeveer 7 cm. Wanneer hij echter het praeparaat, dat de α-deeltjes uitzond, op grooten afstand van het scherm plaatste, nam hij van tijd tot tijd toch een lichtend punt waar; zelfs nog op afstanden van 40–50 cm. Ter verklaring hiervan was slechts mogelijk aan te nemen, dat de stikstofkernen onder het bombardeeren met α-deeltjes nieuwe deeltjes hadden uitgezonden met een aanzienlijk grooter doordringingsvermogen. Een nauwkeurig onderzoek naar den aard van deze vèrrijkende deeltjes, bijvoorbeeld door afbuiging in electrische en magnetische velden, toonde met zekerheid aan, dat zij eenvoudig uit waterstofkernen bestaan, die slechts van de stikstof afkomstig kunnen zijn. Hiermede was experimenteel het bewijs geleverd, dat stikstofkernen waterstofkernen als bouwsteenen bevatten. Deze ervaring aangaande de fundamenteele rol van de waterstofkern was aanleiding, daarvoor een afzonderlijken naam in te voeren, en wel dien van proton.

Rutherfords eerste kernsplitsingsproef werd spoedig gevolgd door een reeks overeenkomstige experimenten met verschillende lichte elementen, waarvan verscheidene, evenals stikstof, protonen bleken uit te zenden. Een fraaie variatie van Rutherfords proef gaf Blackett, door condensatiekamer-opnamen te maken van kernsplitsingsprocessen; hij photographeerde daartoe de banen van α-deeltjes in een Wilson-kamer, gevuld met

stikstof. Op grond van de zeldzaamheid, waarmede α-deeltjes een kernsplitsing bewerkstelligden, moest hij vele duizenden opnamen maken, vóór hij er in slaagde, een photo te verkrijgen, die de uitzending van een proton in beeld brengt. Figuur 28, Plaat VII toont een der mooiste opnamen: men ziet een bundel α-deeltjes, waarvan er één zich vertakt ter plaatse waar de botsing tusschen α-deeltjes en stikstofkern heeft plaats gevonden. De dunne, rechtlijnige baan in dwarse richting is die van het snelle proton; zij kenmerkt zich door een geringere ionisatie dan die van het invallende α-deeltje. De korte tak is de baan van de atoomkern, die bij de botsing in beweging is gebracht. Daarentegen ontbreekt een tak, die zou behooren bij het α-deeltje na de botsing, waaruit men kan concludeeren, dat dit in de stikstofkern is opgenomen op het oogenblik, dat het proton werd uitgezonden. Daar alle opnamen, die Blackett van botsingen gemaakt heeft, dezelfde eigenaardigheid vertoonen, kan men zich voorstellen, dat het proces zich afgespeeld heeft volgens onderstaande vergelijking, waarin het linkerlid de optredende atoomkernen bevat vóór de botsing, het rechterlid die, welke bij de botsing gevormd zijn:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{4}_{2}\mathrm{He} = ^{17}_{8}\mathrm{O} + ^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Daar de som der atoomnummers aan beide zijden van het gelijkteeken gelijk moet zijn, evenals de som der atoomgewichten, die daarboven staan, moest er bij de botsing een element gevormd zijn met het atoomnummer 8, dat wil zeggen een zuurstofisotoop met atoomgewicht 17. Jammer genoeg werd deze isotoop eerst vele jaren later ontdekt en wel in gewone zuurstof, waarin zij in uiterst geringe hoeveelheid voorkomt.

Rutherfords proef verschafte dus niet alleen de zekerheid, dat de atoomkernen protonen bevatten, maar leverde tevens het bewijs, voor de eerste maal in de geschiedenis der menschheid, dat het mogelijk is, kunstmatig het eene element in het andere om te zetten, zij het in uiterst geringe hoeveelheid. Zeer zeker was het slechts de atoomkern, die van stikstof in zuurstof was veranderd, maar dat was ook het belangrijkste, aangezien de rest van het proces vanzelf geschiedt, daar de nieuw gevormde zuurstofkern, zoo spoedig zij tot rust is gekomen, onmiddellijk het electron opneemt, dat ontbreekt om het aantal electronen voltallig te maken. Men kan zonder overdrijving zeggen, dat met deze experimenten een nieuw tijdperk in de physica was ingeluid, doordat een geheel nieuw onderzoekingsgebied was betreden: dat der experimenteele atoomkernphysica.

Kernsplitsing door kunstmatige projectielen

Hoewel de α-deeltjes van de radio-actieve elementen over zoo groote hoeveelheden energie als 6–8 millioen electron-Volt beschikken, is het aantal kernsplitsingen toch begrensd, aangezien men slechts een beperkt aantal deeltjes ter beschikking heeft. Een sterk radio-actief praeparaat kan wel is waar 10^9 α-deeltjes per seconde uitzenden, doch daar men in den regel slechts één „voltreffer" heeft op 10^6 α-deeltjes, kunnen maximaal 1000 atomen per seconde gevormd worden. Ten einde 1 gram van een element om te zetten, zou men de beschieting dus 10^{19} seconden oftewel 1 billioen jaren moeten volhouden, hetgeen iets te veel gevergd zou zijn van het geduld der experimentators!

Wanneer men echter voldoend snelle deeltjes, bij-

voorbeeld α-deeltjes of protonen kon voortbrengen langs kunstmatigen weg, bijvoorbeeld door middel van een kanaalstralenbuis, waarin aan gewone helium- of waterstofatomen, die in onbeperkte hoeveelheid beschikbaar zijn, onder invloed van zeer hooge electrische spanningen een voldoende hooge snelheid verleend wordt, dan zou men een veel hoogere productie kunnen bereiken. Met een protonenstraal, teweeg gebracht met een stroom van slechts 1 milli-Ampère, dus met ongeveer $^1/_{50}$ van den stroom, dien een gewoon gloeilampje gebruikt, zou men reeds over 10^{16} deeltjes per seconde kunnen beschikken, dus millioenen malen zooveel als de sterkste radio-actieve praeparaten leveren. De moeilijkheid is intusschen, zoodanig hooge electrische spanningen teweeg te brengen, dat de energie der protonen groot genoeg wordt.

Ten tijde, dat Rutherford zijn eerste kernsplitsingen uitvoerde, beschikte men over hoogspanningsapparaten, die een gelijkstroom van ongeveer 200.000 Volt konden leveren; men meende echter, dat deze spanning veel te klein zou zijn voor kernsplitsingen in vergelijking met de millioenen Volt der α-deeltjes. Naar mate de techniek vooruitging, bereikte men echter hoogere spanningen, en in 1932 waagden twee van Rutherfords leerlingen, Cockcroft en Walton, een proef met een zelfgemaakt hoogspanningsapparaat, dat spanningen tot 700.000 Volt kon leveren. Hun ondernemingszin werd boven alle verwachtingen beloond: het gelukte reeds bij eenige honderdduizenden Volts kernsplitsing teweeg te brengen.

De genoemde onderzoekers zonden een stroom protonen in een lange buis, waarin de deeltjes onder invloed van een spanning van die grootte hun aanzienlijke snel-

heid ontvingen, waarna zij ze een dun plaatje van het metaal lithium lieten bombardeeren. Zij constateerden toen, dat van dit plaatje zeer snelle deeltjes uitgingen, die bij een nader onderzoek heliumkernen bleken te zijn, met andere woorden: kunstmatige α-deeltjes. Daar men met zekerheid wist, dat er geen radio-actieve stoffen in het apparaat waren en er ook geen helium in voorkwam, daar men slechts met waterstof en lithium werkte, moest men wel aannemen, dat men voor een elemententransmutatie stond, voor het eerst langs geheel kunstmatigen weg teweeggebracht. Daar de meest voorkomende isotoop van lithium het atoomgewicht 7 bezit, nam men aan, dat het zulk een lithiumkern was, die een proton had opgenomen en daarbij gesplitst in twee heliumkernen volgens de vergelijking:

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + ^{1}_{1}\mathrm{H} = ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{4}_{2}\mathrm{He},$$

waarbij de som van de atoomgewichten en van de atoomnummers voor en achter het gelijkteeken weer even groot is.

Terwijl Cockcroft en Walton een zinksulfidescherm gebruikten voor de waarneming van de α-deeltjes en de bijbehoorende metingen, slaagde men er korten tijd later in, de α-deeltjes te photographeeren met behulp der condensatiekamer. Figuur 29, Plaat VIII toont een dezer opnamen; de protonen zijn van boven gekomen, terwijl het gebombardeerde lithium zich in een buis bevindt, die in de condensatiekamer is gestoken. De photo laat duidelijk zien, dat de twee, bij iedere kerndeeling gevormde, α-deeltjes paarsgewijze weggeschoten worden in bijna tegengestelde richtingen en dat zij een zeer bepaald doordringingsvermogen bezitten. Uit nauwkeurige metingen bleek, dat deze kunstmatige

α-deeltjes over een afstand van 8.4 cm in lucht doordringen, verder dan de snelste natuurlijke, van radioactieve stoffen afkomstige α-deeltjes. Deze afstand komt overeen met een energie van totaal 17 millioen Volt voor de beide deeltjes, een merkwaardig resultaat, aangezien de als projectielen gebruikte protonen slechts een energie bezaten, overeenkomende met circa 400.000 Volt. Dit is kennelijk een voorbeeld van de bevrijding der groote hoeveelheden energie, die in de atoomkernen gebonden voorkomt.

Het bleek, dat de verklaring van de groote winst aan energie daarin gelegen was, dat een deel van de oorspronkelijke massa der kern verdwenen was en omgezet in bewegingsenergie voor de α-deeltjes. Zooals men zich zal herinneren, bracht Einsteins relativiteitstheorie de merkwaardige consequentie mede, dat met een bepaalde massa de hoeveelheid energie overeenkomt, gelijk aan het product dier massa en het kwadraat der lichtsnelheid, zonder dat men nochtans voordien experimenteel gevonden had, dat massa in energie omgezet kan worden of omgekeerd. Wanneer dit de verklaring zou zijn van de energie-ontwikkeling in de boven beschreven proef, dan zou men kunnen verwachten, dat de som der atoomgewichten der betreffende atomen bij het proces een vermindering had ondergaan.

De vroeger beschreven metingen van atoomgewichten met Astons massaspectograaf hadden als resultaat opgeleverd, dat de atoomgewichten van alle isotopen een geheel veelvoud van dat van waterstof bedragen. Naar mate echter de nauwkeurigheid der metingen toenam, kon men toch kleine afwijkingen van dezen regel constateeren. Reeds in de inleiding is vermeld, dat een

zuurstofatoom ongeveer 16 keer zoo zwaar is als een waterstofatoom, maar in werkelijkheid is het nauwkeurige bedrag 15.86. Intusschen had men reeds van oudsher op practische gronden het atoomgewicht op precies 16 vastgesteld, zoodat waterstof, dat 15.86 maal zoo licht is, dan een atoomgewicht van 1.008 krijgt. Voor de lithiumisotoop $^{7}_{3}$Li vindt men een atoomgewicht van 7.017, terwijl dat van helium 4.003 wordt. De dieper liggende verklaring dezer kleine schoonheidsgebreken der atoomgewichten zullen wij in een volgend hoofdstuk leeren kennen; de waarden zullen in dit verband slechts gebruikt worden om inzicht te verkrijgen in de energie-uitbarsting van lithium.

Door de atoomgewichten van waterstof en lithium op te tellen, krijgt men een waarde van 8.025, die de totale massa vóór het proces aangeeft, terwijl het totale gewicht van de twee heliumkernen, die bij het proces ontstaan zijn, slechts 8.006 bedraagt. Het verschil tusschen de massa der deeltjes bedraagt dus 0.019, of, omgerekend in grammen, 3×10^{-26} gram. Wordt dit massaverlies nu opgenomen in Einsteins formule voor het massa-energie-aequivalent, dan krijgt men juist een energie van ongeveer 17 millioen electron-Volt, in treffende overeenstemming met de bewegingsenergie der α-deeltjes, bij de proeven gemeten, wanneer men de bewegingsenergie der invallende protonen, die gering is in vergelijking tot de 17 millioen Volt, verwaarloost.

De proef van Cockcroft en Walton beteekent dus in verschillende opzichten pionierswerk: in de eerste plaats werd daarbij voor de eerste maal een geheel kunstmatige elemententransmutatie bereikt en bovendien had men met dit proces in zekeren zin het record gebroken, dat

de α-straling der radio-actieve elementen tot dan toe had bezeten, nota bene nog door het gebruik van protonen met betrekkelijk geringe energie. Ten slotte hield deze proef een experimenteele bevestiging in van het, door Einstein zuiver langs theoretischen weg gevonden, verband tusschen energie en massa.

Wanneer zulk een proef eenmaal is genomen, is het steeds betrekkelijk eenvoudig, verder te experimenteeren, en binnen korten tijd was dan ook een geheele reeks kernsplitsingen van verschillende elementen door middel van bombardeering met protonen uitgevoerd. Voorts kwam men, zoo spoedig men zware waterstof in voldoende groote mate kon bereiden, op de gedachte de kernen van de zware waterstofisotoop als projectielen te gebruiken. Daar deze bleken van zeer groot nut te zijn bij kernsplitsingsprocessen, heeft men, evenals den gewonen waterstofkernen, dien der zware isotoop een afzonderlijken naam gegeven, en wel dien van deuteron. Als een voorbeeld van wat deuteronen tot stand kunnen brengen, zullen wij de beschieting bespreken van de lichte lithiumisotoop ${}^{6}_{3}$ Li, die daarbij eveneens in twee α-deeltjes gesplitst wordt volgens de vergelijking:

$$ {}^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} = {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}; $$

de α-deeltjes worden in dit geval uitgezonden met een totale energie van niet minder dan 23 millioen electron-Volt. Het bewijs, dat het werkelijk de bedoelde lithiumisotoop was, die aan het proces deelnam, werd in 1934 geleverd door den Engelschman Oliphant, die lithiumpraeparaten gebruikte, waarin de in natuurlijke lithium voorkomende isotopen met atoomgewichten 6 en 7 van elkaar gescheiden waren met een apparaat, dat werkte volgens het principe van Astons massaspectrograaf.

De nieuwe elementairdeeltjes

Voor wij er toe overgaan, de stormachtige ontwikkeling te schilderen, waartoe de eerste atoomsplitsingen aanleiding gaven, is het noodzakelijk, de ontdekking van nieuwe deeltjes, die voordien aan de nasporingen der natuurkundigen ontsnapt waren, te vermelden. Deze nieuwe partikels behooren tot de belangrijke groep van deeltjes, die den naam elemantairdeeltjes dragen, aangezien aangenomen wordt, dat zij niet samengesteld zijn, in tegenstelling tot atomen en atoomkernen, die uit elementairdeeltjes zijn opgebouwd.

Tot 1932 wist men slechts van het bestaan van twee zulke elementairdeeltjes, namelijk de electronen, die het buitenste deel der atomen vormen en de protonen, die deel uitmaken van alle atoomkernen. In het voor de physica zoo belangrijke jaar 1932 kreeg men te maken met niet minder dan twee nieuwe elementairdeeltjes, namelijk het positron, dat door den Amerikaan Anderson ontdekt werd en het neutron, gevonden door den Engelschman Chadwick.

Het bestaan van positronen, dat wil zeggen, deeltjes met hetzelfde gewicht als de electronen, doch met een positieve elementairlading, was reeds voorspeld door Dirac uit zuiver theoretische beschouwingen, waaraan echter slechts enkelen aandacht geschonken hadden. Andersons ontdekking van dit deeltje was een gelukkige vondst; hij dacht allerminst aan positronen, toen zij zich bij hem aanmeldden. Hij hield zich namelijk bezig met een geheel anderen, maar even spannenden tak der physica, namelijk de bestudeering der cosmische stralen. Dit raadselachtige natuurverschijnsel, dat het eerst door den Oostenrijker V. F. Hess ontdekt werd in 1912, openbaart zich als een straling met een onge-

loofelijk groot doordringingsvermogen, die zonder onderbreking, dag en nacht, jaar na jaar, uit de wereldruimte ongeveer loodrecht op de aarde valt. De ontdekking der straling geschiedde door haar eigenschap, lucht geleidend te maken voor electriciteit: zij ioniseert de lucht op dezelfde wijze als de stralen der radioactieve stoffen en de Röntgenstralen zulks doen. Het doordringingsvermogen is zóó groot, dat de cosmische stralen zich nog doen gelden, nadat zij meterdikke ijzer- of loodplaten gepasseerd zijn. Dat de stralen werkelijk uit de wereldruimte komen, blijkt duidelijk uit de omstandigheid, dat hun sterkte aanzienlijk toeneemt, naar mate men hooger in de atmosfeer komt. Hess ontdekte de cosmische stralen dan ook, door metingen te verrichten van den ioniseeringsgraad der lucht bij ballonopstijgingen.

Deze geheimzinnige straling heeft in den loop der jaren een groot aantal onderzoekers bezig gehouden, die op verschillende manieren getracht hebben, het raadsel tot oplossing te brengen. Men heeft o.a. ballontochten ondernomen tot zeer groote hoogten, hetgeen de aandacht getrokken heeft in breede kringen, ook buiten dien der natuurkundigen. De Belg Piccard bereikte daarbij de fantastische hoogte van 16 kilometer, en mat daar de intensiteit der straling. Zonder de waarde van deze imponeerende prestatie te willen verkleinen, moet toch naar voren gebracht worden, dat de belangrijkste resultaten bereikt zijn door ballonnen met zelfregistreerende instrumenten op te laten, een methode, die tot een hoogen graad van volmaaktheid opgevoerd werd door den Duitscher Regener, die nauwkeurige metingen wist te verrichten tot op een hoogte van 30 kilometer boven de aarde. Op deze hoogte

is de straling vele honderden malen zoo sterk als op het aardoppervlak, aangezien de atmosfeer der aarde de straling evenzeer verzwakt als een laag water van 10 meter dikte of een loodplaat ter dikte van 1 meter zou doen. Voorts heeft men ook onderzocht, in welke mate de straling verzwakt wordt door dikke lagen water en aarde, door meetinstrumenten tot op groote diepten neer te laten in water en door metingen te verrichten in mijngangen.

Al dezen inspanningen ten spijt, bleef de aard der cosmische stralen langen tijd onverklaard; men aarzelde tusschen twee verklaringswijzen, waarvan de eene er van uitging, dat de stralen van electromagnetischen aard waren en een ontzettend kleine golflengte bezaten, nog kleiner dan die der γ-stralen, terwijl de andere verklaring in de cosmische stralen electronen met een zeer hooge snelheid zag. Onder de verschillende andere methoden, die toegepast zijn bij de bestudeering der cosmische stralen, speelt de condensatiekamer een bijzonder belangrijke rol, aangezien men langs dien weg direct de banen kan photographeeren, hetzij van de eigen deeltjes der straling, hetzij van de secundaire deeltjes, vrijgemaakt door de straling, wanneer zij andere stoffen passeert.

Het was met zulk een onderzoek, dat vorengenoemde Anderson bezig was. Hij bracht zijn condensatiekamer aan tusschen de polen van een zeer sterken electromagneet, ten einde door de afbuiging der banen de snelheid der deeltjes te kunnen bepalen, en begon te photographeeren. De meeste opnamen gaven niets te zien, daar de cosmische stralen, hoewel men van hun aanwezigheid zeker kan zijn, zulk een groote spreiding bezitten, dat iedere vierkante decimeter slechts éénmaal

per seconde getroffen wordt. Andere opnamen verrieden de aanwezigheid van electronen met zeer verschillende snelheden, af te leiden uit de meer of minder sterke kromming der banen, doch ten slotte verkreeg men enkele photo's, die banen te zien gaven, waarvan de kromming tegengesteld was aan die der andere electronenbanen, en die dus afkomstig moesten zijn van deeltjes met een positieve lading.

Figuur 30, Plaat VIII toont de historische opname, die het bestaan van het positron voor de eerste maal aanschouwelijk maakten. Het deeltje ging door een 6 mm dikke loodplaat, die in de condensatiekamer was aangebracht, waarbij het aan snelheid inboette, hetgeen blijkt uit de sterke kromming der baan voorbij de looden plaat: een langzaam deeltje wordt sterker afgebogen dan een snel. Door de aanwezigheid van de looden plaat werd men in staat gesteld, de bewegingsrichting van het deeltje met stelligheid vast te stellen, daar het bij het passeeren der plaat natuurlijk slechts snelheid kon verliezen. De kennis van de bewegingsrichting was noodzakelijk om algeheele zekerheid te verkrijgen, dat men met een positron te doen had, aangezien een electron, dat zich in tegengestelde richting bewoog met dezelfde snelheid, precies dezelfde baan zou hebben beschreven.

Bovendien kon de photo inlichtingen verschaffen over de massa van het nieuwe deeltje. Bij een vluchtige beschouwing zou men misschien kunnen denken, dat men met een proton te doen had, aangezien dit immers een positieve lading bezit. Waar het proton echter tamelijk zwaar is, zou het, gezien de sterke kromming der baan, ongewoon langzaam hebben moeten zijn; een dusdanig traag proton ware echter in staat geweest, slechts enkele

mm af te leggen in lucht, zoodat het tot het passeeren van een dikke looden plaat allerminst in staat zou zijn geweest. Indien men echter aanneemt, dat de massa van het deeltje dezelfde is als die van een electron, wordt het groote doordringingsvermogen begrijpelijk, aangezien de kromming dan overeenstemt met een bewegingsenergie van 63 millioen Volt vóór en 23 millioen Volt na het passeeren van de looden plaat.

Nu was één opname uit den aard der zaak wat weinig om een volkomen overtuigend bewijs te leveren van het bestaan der positronen, maar men slaagde er ook spoedig in, er nog talrijke meer te maken. Een groote verbetering in de wijze van experimenteeren werd aangebracht door Blackett en Occhialini, die hun apparaat voorzagen van een automatischen belichter, zoodat de straling zelf de condensatiekamer in werking bracht en den sluiter opende. Hierdoor voorkwam men het maken van vele opnamen, waarop niets belangrijks te zien was, en langs dien weg verkreeg men zoovele opnamen van positronen, dat hun bestaan onomstootelijk vast kwam te staan.

Echter moest nog het bewijs geleverd worden, dat men werkelijk te doen had met het deeltje, waarvan Dirac het bestaan voorspeld had. Men zou zich dit kunnen verschaffen, door energie om te zetten in een deeltjes-complex, bestaande uit een positron en een electron. De daartoe benoodigde energie, die, zooals wij gezien hebben, volgens de theorie ten minste 1,1 millioen Volt bedraagt, zou men bijvoorbeeld teweeg kunnen brengen door een γ-straling met voldoende kleine golflengte. Daar men nu door de cosmische straling zekerheid had verkregen van het bestaan der positronen, was de proef, de vorming van zulk een

deeltjes-complex langs kunstmatigen weg te bewerkstelligen, zeer verlokkend. Hierin slaagden bijna gelijktijdig zoowel Anderson in Amerika, Lise Meitner in Duitschland en het echtpaar F. Joliot en Irène Joliot-Curie, dochter van Madame Curie, in Frankrijk. Zij bestraalden een condensatiekamer met γ-stralen met een energie van meer dan 1,1 millioen Volt en verkregen daarbij werkelijk photo's van twee deeltjes, die van hetzelfde punt uitgaan, en welker banen onder invloed van een magneet een tegengestelde kromming vertoonen. Figuur 31, Plaat IX brengt zulk een vormingsproces in beeld.

Deze proef toonde met voldoende duidelijkheid aan, dat Diracs theorie, die met zooveel scepticisme was ontvangen, tot in hoofdtrekken juiste resultaten leidde: de voorspelde vorming van een deeltjescomplex bleek niet alleen plaats te vinden, maar geschiedde ook even zeldzaam als de theorie eischte. Ten slotte kan vermeld worden, dat uit proeven is gebleken, dat ook het omgekeerde proces plaats vindt, met andere woorden, dat een positron en een electron verdwijnen onder uitzending van γ-straalquanten met een energie van, zooals verwacht mocht worden, 1,1 millioen Volt.

Voor wij de geschiedenis van het positron beëindigen, dient nog besproken te worden, welke mogelijkheden Diracs theorie der positronen biedt tot het oplossen van het probleem van den aard der cosmische stralen. Men neemt aan, dat deze in ieder geval bestaan uit een mengsel van electronen, positronen en γ-stralen, die onafgebroken met elkaar in wisselwerking staan, doordat de γ-straling de vorming van snelle electronen en positronen veroorzaakt, die òf weer te niet gaan onder vernieuwde uitzending van γ-stralen, òf, wanneer zij

afgeremd worden, een electromagnetische straling van kleine golflengte teweeg brengen, op dezelfde wijze als de continue Röntgenstraling ontstaat door afremming van snelle electronen.

Maar toch brengt de cosmische straling nog tal van onopgeloste problemen mede, zooals bijvoorbeeld haar ontstaan in de wereldruimte en de vraag, of zij een biologisch effect bezit. Het is een gebied, dat nog vele verrassingen kan bieden, voornamelijk op grond van de geweldige krachten, die bij de onderhavige processen omgezet worden, en die in bepaalde gevallen waarden tot een milliard Volt kunnen bereiken. Wij bevinden ons hier op een terrein, te veel omvattend, dan dat men mag verwachten, het ooit door laboratoriumproeven toegankelijk te maken, en dat vol mogelijkheden tot geheel nieuwe ontdekkingen ligt. [8])

Een lezer met zin voor symmetrie zal misschien verwachten, dat het volgende nieuwe elementairdeeltje, dat aan de orde gesteld wordt, een negatief proton zal zijn, maar helaas moeten wij hem teleurstellen met de mededeeling, dat, mocht zulk een deeltje al bestaan, het nog op zijn ontdekking wacht. Het volgende elementairdeeltje blijkt namelijk wel is waar dezelfde massa te bezitten als een proton, maar daarentegen geen lading, positief noch negatief. De ontdekking bracht grootere moeilijkheden mede dan die van het positron, aangezien een neutraal deeltje geen banen in een condensatiekamer teweeg kan brengen. Zonder electrische lading bestaat er immers geen electrische aantrekking

---

8) In den allerlaatsten tijd hebben nevelkamerphoto's geleerd, dat er in de cosmische straling nog een geheel ander, nieuw deeltje voorkomt met een massa, die gelegen is tusschen die der protonen en die der electronen, doch waarvan de eigenschappen nog niet bekend zijn.

of afstooting tusschen de protonen en de electronen in het atoom, zoodat ook niet de ionen in de lucht gevormd kunnen worden, waarop het verschijnsel der vorming van nevelbanen in de Wilsonkamer berust.

Nadat men door Rutherfords eerste kernsplitsingsprocessen ontdekt had, dat vele der lichtere atoomkernen protonen kunnen afgeven, wanneer zij beschoten worden met α-deeltjes, waren er talrijke onderzoekers, die voortgingen met overeenkomstige experimenten. Het bleek toen, dat, wanneer men het element beryllium bombardeerde met α-deeltjes, dit in plaats van protonen, een doordringende γ-straling uitzendt, en, wat nog merkwaardiger is, bovendien een geheel nieuwe, eveneens zeer doordringende straling, gekenmerkt door hoogstmerkwaardige eigenschappen. Terwijl alle reeds eerder bekende stralen aangetoond konden worden door hun ioniseerend effect, was dit niet het geval met de nieuwe straling. Daarentegen was deze zoogenaamde beryllstraling in staat, bij het passeeren van verschillende lichtere elementen, den atoomkernen daarvan zulk een krachtigen stoot te geven, dat deze in de condensatiekamer een baan van verscheidene centimeters lengte afteekenden. Zulk een groot effect op de zware kernen kon natuurlijk niet veroorzaakt zijn door een licht deeltje. Bij de bepaling der lengte van de banen der weggeslingerde kernen voor verschillende elementen, was men in staat, vast te stellen, in welke gewichtsklasse het deeltje, dat de botsing veroorzaakt had, thuis behoort. Dit werd het eerst gedaan door Chadwick, die, door den doordringingsafstand van waterstof- en stikstofkernen te meten, welke door beryllstralen in beweging waren gebracht, kon vaststellen, dat de straling bestond uit deeltjes met ongeveer dezelfde massa als

die der protonen. Daar de deeltjes, zooals gezegd, zelf geen banen in de condensatiekamer afteekenen, en dus electrisch neutraal zijn, gaf Chadwick ze den naam neutronen. Figuur 32, Plaat IX, toont een opname van een condensatiekamer, gevuld met helium, en waarbuiten een zoogenaamde neutronenbron opgesteld was: een mengsel van berylliumpoeder en een radio-actief praeparaat, dat α-stralen uitzendt. Van de uit deze bron komende neutronen, die zonder moeite den wand van de condensatiekamer passeeren, ziet men uit den aard der zaak niets op de photo. Daarentegen is er een korte baan te zien, toe te schrijven aan een heliumkern, die door een neutron geraakt en daardoor in beweging gebracht is. Het feit, dat de baan begint en eindigt binnen de ruimte der condensatiekamer, toont duidelijk aan, dat de oorzaak der kernbeweging, het neutron, onzichtbaar is. Photo's van dezen aard maakten op natuurkundigen, die ze voor de eerste maal zagen, denzelfden indruk, dien de lezer zou ontvangen, wanneer dit boek plotseling en zonder zichtbare oorzaak met kracht de lucht in vloog. Het neutron gedraagt zich in het algemeen voor een stoffelijk deeltje zeer vreemd, voornamelijk ten gevolge van het ontbreken eener lading. Zoo kan het door de lucht vele kilometers afleggen en door loodplaten dringen met een dikte van 10–20 cm, terwijl een proton met dezelfde snelheid in bladlood ter dikte van $^1/_4$ mm reeds een onoverkomelijken hinderpaal zou hebben ontmoet. Een geladen deeltje zal namelijk bij het passeeren van een stof op zijn weg de atomen ioniseeren, doch bij iedere ionisatie verliest het een hoeveelheid bewegingsenergie, die gebruikt wordt om een buitenelectron uit het betreffende atoom te bevrijden. Daar hiervoor ongeveer 10 Volt noodig is, zal

bijvoorbeeld een proton met een energie van 1 millioen Volt reeds tot stilstand zijn gekomen, wanneer het 10^5 ionen gevormd heeft, hetgeen in lucht reeds binnen een afstand van enkele cm geschiedt. Een ongeladen deeltje daarentegen, dat de atomen niet ioniseert, kan op deze wijze echter geen energie verliezen: daartoe is een botsing met een atoomkern zelf noodig, en daar zulke botsingen slechts uiterst zelden voorkomen, is het begrijpelijk, dat neutronen door groot hoeveelheden materie kunnen dringen, zonder afgeremd te worden. Het is daardoor onmogelijk, neutronen in een vat te bewaren, daar zelfs het dichtste materiaal, dat men zich kan voorstellen, als een zeef is voor de neutronen.

Nadat het nieuwe elementairdeeltje, ondanks zijn neiging, zich te verbergen, ontdekt was, begon men zich af te vragen hoe het eigenlijk ontstaat. Wanneer beryllium bij een bombardement met α-deeltjes neutronen uitzendt, staan wij blijkbaar opnieuw voor een kernsplitsingsproces, bestaande uit de uitzending van neutronen door de kern. Daar beryllium echter een vaste stof is, kan men niet, zooals bijvoorbeeld Rutherford deed bij de verbrijzeling van stikstofkernen, condensatiekameropnamen van afzonderlijke processen maken, om deze in alle détails te bestudeeren. Aangezien er echter slechts één berylliumisotoop bestaat, namelijk ${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$, is er een goede grond, aan te nemen, dat het proces, waarbij de neutronen gevormd worden, uitgedrukt kan worden door de vergelijking:

$$ {}^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} = {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}, $$

waarin het neutron, dat de massa 1 en de lading 0 bezit, aangeduid wordt door ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$. Bij het proces zou dan

de gewone koolstofisotoop $^{12}_{6}$ C gevormd moeten worden.

Behalve door beryllium worden ook door een reeks andere lichte stoffen neutronen uitgezonden, wanneer zij beschoten worden met α-deeltjes, doch in den regel slechts in geringe mate.

Bij de ontdekking der neutronen slaakten allen, die nagedacht hadden over de structuur der atoomkernen, een zucht van verlichting, aangezien men nu kennelijk het elementairdeeltje had leeren kennen, dat ontbrak om den bouw der kernen plausibel te kunnen maken. Vroeger had men aangenomen, dat de kern zooveel protonen bevatte als met het atoomgewicht overeenkwam, hetgeen immers noodzakelijk was om begrijpelijk te maken, dat de atoomgewichten in de nabijheid van geheele getallen lagen. Deze veronderstelling bracht echter mede, dat de kernlading te groot werd, aangezien deze in den regel slechts de helft van het atoomgewicht bedraagt. Ten einde de lading van deze overschietende protonen te neutraliseeren, had men de hypothese opgeworpen, dat de kern zooveel electronen zou bevatten, dat de juiste kernlading overbleef, doch deze veronderstelling bracht talrijke moeilijkheden van theoretischen aard mede.

Een van de grootste dezer moeilijkheden bestond daaruit, dat in de kern gelegen electronen op grond van hun spin de kern zoodanige magnetische eigenschappen moesten verleenen, dat deze een magnetische beïnvloeding der buiten-electronen ten gevolge diende te hebben. Zulk een beïnvloeding zou zich kenbaar moeten maken door een extra splitsing der spectraallijnen van het element, hetgeen strijdig was met de empirische resultaten, aangezien de bekende splitsing der spectraallijnen geheel voor rekening komt van de spin der buitenelectronen.

Daarom waren de neutronen zoo welkom: men behoefde zich slechts voor te stellen, dat iedere atoomkern

opgebouwd is uit zooveel protonen, als met de kernlading overeenstemt en verder zooveel neutronen, dat het totaalgewicht der deeltjes gelijk wordt aan het atoomgewicht. De zware waterstofkern (deuteron) $^{2}_{1}$H, zou dan bijvoorbeeld moeten bestaan uit 1 proton en 1 neutron en een α-deeltje $^{4}_{2}$He uit 2 protonen en 2 neutronen. Op overeenkomstige wijze komt de lithiumisotoop $^{6}_{3}$Li 3 protonen en 3 neutronen toe, de lithiumisotoop $^{7}_{3}$Li 3 protonen en 4 neutronen, terwijl een radiumkern $^{226}_{88}$Ra opgebouwd moet zijn uit 88 protonen en 226 — 88 = 138 neutronen.

Dat een zware waterstofkern werkelijk niets anders is dan een gewone waterstofkern plus een neutron, werd op onmiddellijke wijze aangetoond door een bijzonder fraai experiment, waarbij men er in slaagde, de zware waterstofkern in haar bestanddeelen te splitsen. Men bereikte dit door haar te bestralen met een α-straling van zeer geringe golflengte. Het proces kan uitgedrukt worden door de vergelijking:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} = ^{1}_{1}\mathrm{H} + ^{1}_{0}\mathrm{n}.$$

Het merkwaardige hierbij is vooral, dat het niet teweeg is gebracht zooals alle voorgaande kernsplitsingsprocessen, door de stootwerking van stoffelijke deeltjes, doch door bestraling met electromagnetische golven, zoodat het geheel analoog is aan het vroeger besproken photo-effect, waarbij men door bestraling met licht van geringe golflengte een atoom splitste in een electron en een ion. Een verschil is gelegen in de omstandigheid, dat voor het kernphoto-effect zoo geweldig veel grootere energie noodig is, zoodat het experiment

dan ook slechts uit te voeren was met de kortste γ-stralen, waarover men beschikte.

Men komt echter bedrogen uit, wanneer men aanneemt, dat alle moeilijkheden inééns waren opgelost, door aan te nemen, dat de atoomkernen eenvoudig uit protonen en neutronen bestaan. Van de radio-actieve stoffen is namelijk met zekerheid bekend, dat de kernen van verscheidene dezer electronen in den vorm van β-deeltjes uitzenden, en deze omstandigheid spreekt ten voordeele van de vroegere veronderstelling, dat de kernen ook electronen bevatten. De bovengenoemde moeilijkheden, door deze hypothese medegebracht, zijn echter zoo groot, dat voor de uitzending der β-stralen noodwendig een andere verklaring moest worden gezocht. Daar door de theorie van Dirac en door proeven was komen vast te staan, dat electronen geschapen en vernietigd kunnen worden, is het niet zóó fantastisch, aan te nemen, dat de electronen, uitgezonden door de β-stralen, vóórdien niet in de kern aanwezig waren, doch gevormd worden in het moment van uitzending. Daar een atoomkern bij het uitzenden van een β-straal haar massa behoudt, doch haar positieve kernlading met 1 vermeerdert, ligt het voor de hand, te veronderstellen, dat een der neutronen van de kern bij de uitzending van een β-straal veranderd is in een proton op de volgende wijze:

$$^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}\ \mathrm{p}$$

Het essentieele van deze nieuwe hypothese is intusschen, dat men een neutron niet opvat als een samengesteld deeltje, bestaande uit een proton en een electron, doch als een elementairdeeltje, dat bij het scheppingsproces, waarbij het electron gevormd wordt, verandert

in een ander elementairdeeltje, een proton. Waar wij thans kennis gemaakt hebben met al de tot nu toe ontdekte elementairdeeltjes, zullen wij onze aandacht wijden aan andere kernsplitsingsprocessen, waarbij deze deeltjes een rol spelen.

Kunstmatige radio-activiteit

Het belangrijkste hulpmiddel bij de ontwikkeling der moderne atoomphysica is stellig de α-straling geweest, die, gehanteerd door bekwame experimentators, een gewichtige rol gespeeld heeft bij alle groote ontdekkingen aangaande den bouw der atomen. Herinneren wij ons slechts, dat Rutherford met behulp van α-deeltjes het bestaan van atoomkernen aantoonde en ook de eerste kunstmatige atoomsplitsing tot stand bracht, alsmede, dat zij in staat zijn, neutronen los te maken van de atoomkernen en daardoor het bestaan van een nieuw elementairdeeltje aan het licht gebracht hebben. Ten slotte zullen wij thans kennis maken met nog een prestatie der α-deeltjes: het teweegbrengen van kunstmatige radio-activiteit.

In 1934 ondernam het echtpaar Joliot-Curie proeven met de bombardeering van aluminium met α-deeltjes. Zij ontdekten toen, dat het aluminum, behalve dat het neutronen uitzond, na verloop van enkele minuten een sterk ioniseerende straling begon af te geven, die eenigen tijd aanhield, nadat het α-stralen afgevend praeparaat verwijderd was. Dit geleidelijk toenemen en weer verminderen der straling deed vermoeden, dat een radio-actieve stof gevormd was, welker straling afnam naar mate het element desintegreerde. Een onderzoek met behulp van de nevelkameropnamen in een

magnetisch veld bracht onmiddellijk aan het licht, dat de straling uit positronen bestond.

Voor een nader onderzoek naar het ontstaan der stralen losten de onderzoekers de bestraalde aluminiumplaat op in zoutzuur en vingen zij het zich ontwikkelende waterstofgas in een glazen buis op. Het bleek toen, dat de radio-actieve stof met de waterstof mede kwam: de buis zond ook positronstraling uit, waarvan de halveeringstijd dezelfde was als die van het aluminium. Men moest daaruit de gevolgtrekking maken, dat de radio-actieve stof bij de behandeling met het zuur een gasvormige chemische verbinding gevormd had. Daar er geen gasvormige verbinding bestaat van aluminium, echter wel van het verwante element fosfor, die het gas fosforwaterstof kan vormen, lag het voor de hand, aan te nemen, dat de gevormde radio-actieve stof fosfor was. Het kernmutatieproces zou zich dan volgens de onderstaande vergelijking hebben afgespeeld:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} = ^{30}_{15}\mathrm{P} + ^{1}_{0}\mathrm{n}.$$

De radio-actieve fosfor kan niet bestaan uit de fosforisotoop $^{31}_{15}$ P, die men zou verkrijgen, wanneer het α-deeltje eenvoudig door de aluminiumkern was opgeslokt, aangezien de fosforisotoop $^{31}_{15}$ P de isotoop is, waaruit de gewone, niet radio-actieve fosfor bestaat. Dus moet bij de omzetting tevens een ongeladen deeltje uit de kern ontweken zijn, hetgeen dan een neutron zou moeten zijn. De gevormde radio-actieve fosforisotoop $^{30}_{15}$ P is onstabiel; zij bevat kennelijk een te groote lading voor haar gewicht en ontleedt na verloop van tijd volgens de vergelijking:

Fig. 31. Photo van de banen van een deeltjescomplex, bestaande uit een positron $\overset{+}{e}$ en een electron $\overset{-}{e}$, gevormd in een nevelkamer door γ-stralen, die invallen in een richting als de pijl aangeeft.

Fig. 32. Baan van een heliumkern, die een stoot gekregen heeft van een neutron.

PLAAT X

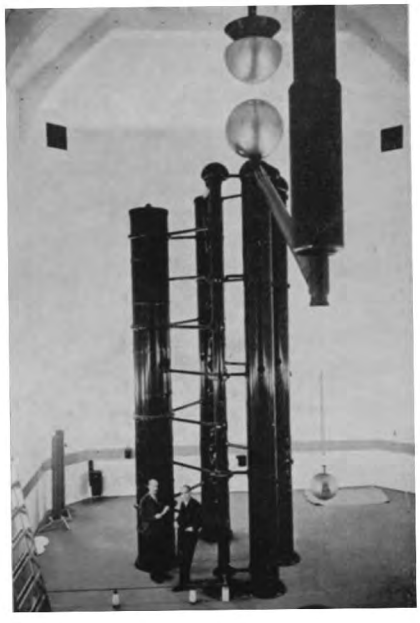


Fig. 33. Hoogspanningsinstallatie van 1 millioen Volt, zich bevindend in het Instituut voor theoretische physica van de Kopenhaagsche Universiteit.

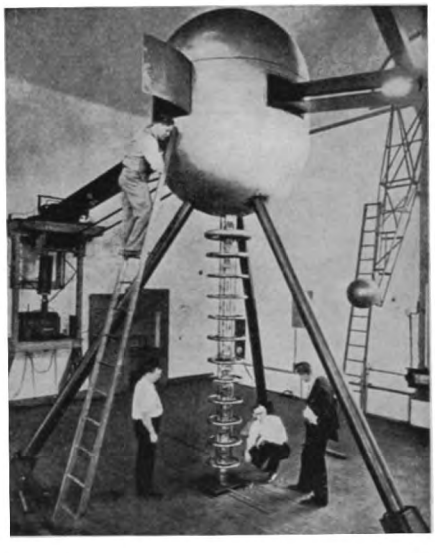


Fig. 34. Hoogspanningsinstallatie van 1,2 millioen Volt volgens systeem van Van de Graaf.

$$^{30}_{15}\mathrm{P} = {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{0}_{1}\mathrm{e}.$$

Onder uitzending van een positron $^{0}_{1}$e is zij dan overgegaan in de stabiele silicium-isotoop $^{30}_{14}$Si, die ook bekend is uit het in de natuur voorkomende silicium.

Evenals de natuurlijke radio-actieve stoffen, bezitten de kunstmatige een zeer bepaalden halveeringstijd, waaronder wij, zooals men zich zal herinneren, den tijd verstaan, die verstrijkt, alvorens de helft der stof gedesintegreerd is en de sterkte der straling daarbij tot de helft is teruggeloopen. Voor de genoemde radio-actieve fosforisotoop vond men een halveeringstijd van 3 minuten en 15 seconden.

Dit eerste voorbeeld van kunstmatig teweeg gebrachte radio-activiteit werd spoedig door andere gevolgd. Reeds kort na de eerste experimenten van Joliot-Curie werden verscheidene overeenkomstige processen bekend, teweeg gebracht door de beschieting van lichte elementen met α-deeltjes, en al deze nieuwe radio-actieve isotopen zonden positronen uit, ieder met hun eigen halveeringstijd.

Deze met behulp van bestralingen teweeggebrachte radio-actieve stoffen onderscheiden zich dus op wezenlijke wijze van die, welke in de natuur voorkomen, doordat zij positronen in plaats van electronen uitzenden. Dit houdt echter niet in, dat nu aangenomen mag worden, dat deze elementen positronen in de kern bevatten, evenmin als de kern der stoffen, die β-stralen afgeven, positronen bevat. Evenals het electron bij de uitzending van een β-straal eerst gevormd wordt in het oogenblik van emissie, moet men bij de uitzending van

een positron aannemen, dat een proton overgaat in een neutron volgens de vergelijking:

$$^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{0}_{1}\mathrm{e}.$$

De kunstmatige radio-actieve stoffen kunnen volgens deze methode natuurlijk slechts in uiterst geringe hoeveelheden tot stand gebracht worden, aangezien de waarschijnlijkheid, dat een der α-deeltjes botst en daardoor een kernomzetting teweeg brengt, zoo klein is, dat men de aanwezigheid der gevormde stoffen niet door middel van weging kan aantoonen. Daarentegen biedt het geen moeilijkheden, haar aanwezigheid te bewijzen uit de door haar uitgezonden stralen, aangezien de methodes, waarover men tot dat doel beschikt, zoo geweldig gevoelig zijn, dat men zelfs de uitzending van een enkel deeltje kan aantoonen. Behalve de nevelkamermethode past men namelijk ook nog een electrische methode toe, gebaseerd op de zoogenaamde telbuis van Geiger, die het mogelijk maakt, afzonderlijke electronen te tellen.

De telbuis bestaat uit een metalen buis, in welker as een geïsoleerde metalen draad gespannen is. In de buis heerscht een onderdruk; aan den draad is een spanning van eenige duizenden Volt aangelegd. Treedt er nu een electron of een ander geladen deeltje in de telbuis, dan komt er een kortdurende ontlading tot stand tusschen den draad en den wand der buis; de zoo gevormde stroomstoot kan met behulp van versterkerlampen zoodanig versterkt worden, dat hij hoorbaar wordt in een luidspreker of een mechanisch telwerk in beweging brengt. Telbuizen worden als een waardevolle aanvulling van de condensatiekamer overal gebruikt, waar met kunstmatige radio-actieve stoffen geëxperimenteerd wordt.

Het teweeg brengen van kunstmatige radio-activiteit was de laatste schakel in de keten van fundamenteele ontdekkingen, die aan de α-deeltjes te danken is. Intusschen had men kennis gemaakt met deeltjes, die zich nog beter voor bombardementen leenden dan de α-deel-

tjes, aangezien deze, afgestooten als zij worden door positieve atoomkernen, nog geenszins ideale projectielen genoemd mogen worden. Dit is ook gebleken uit het feit, dat zij slechts in de kernen der lichtere elementen, die door haar geringere lading ook slechts weinig afstooten, kunnen doordringen. Van de neutronen, die geen lading bezitten, en dus ook niet afgestooten kunnen worden, mocht men in dit opzicht betere resultaten verwachten; het was de Italiaan Fermi, die deze gedachte in 1934 in practijk bracht. Hij maakte daartoe gebruik van de reeds besproken neutronenbron, bestaande uit een mengsel van berylliumpoeder en een praeparaat, dat α-deeltjes uitzendt, en bombardeerde met de gevormde neutronen verschillende stoffen. Het bleek toen, dat bijna alle elementen onder de bestraling radio-actief werden; met behulp van een telbuis bepaalde hij de halveeringstijden dezer stoffen. Anders dan bij de radio-activiteit, teweeg gebracht door beschieting met α-deeltjes, bleek, dat bij de langs dezen weg tot stand gekomen radio-activiteit gewone negatieve electronen werden uitgezonden.

Als voorbeeld van zulk een proces kan de bestraling van zwavel genoemd worden, die slechts de stabiele isotoop ${}^{32}_{16}\mathrm{S}$ bezit, welke onder het neutronenbombardement omgezet wordt in een radio-actieve isotoop van fosfor onder uitzending van protonen volgens de vergelijking:

$$ {}^{32}_{16}\mathrm{S} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} = {}^{32}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}. $$

Deze fosforisotoop is intusschen een andere dan die, welke door het echtpaar Joliot-Curie gevormd werd door beschieting met α-deeltjes: gene bezit het symbool ${}^{30}_{15}\mathrm{P}$, zendt protonen uit in plaats van electronen en

bezit een veel korteren halveeringstijd ($3^1/_4$ minuut voor $^{30}_{15}$ P tegen 15 dagen voor $^{32}_{15}$ P). Deze hoogere halveeringstijd van $^{32}_{15}$ P bracht het voordeel mede, dat men voldoenden tijd ter beschikking kreeg voor het doen van chemische proeven, zoodat men de volkomen zekerheid verwierf, dat de stof de chemische eigenschappen van fosfor bezit. Wel is waar is de hoeveelheid van het gevormde $^{32}_{15}$ P zoo gering, dat het slechts uit zijn straling aangetoond kan worden, doch door een grooter hoeveelheid gewonen fosfor toe te voegen, was het mogelijk, fosforverbindingen te vormen. Daar bleek, dat de radio-actieve fosfor voorkwam in alle precipitaten, neergeslagen uit de gevormde verbindingen, waarin bij aangetoond kon worden door zijn straling, was aangetoond, dat radio-actieve fosfor slechts een onstabiele isotoop van den gewonen fosfor is. De isotoop $^{32}_{15}$ P heeft, in tegenstelling met $^{30}_{15}$ P een te groote massa in verhouding tot haar lading, ten gevolge waarvan een der neutronen van de kern overgaat in een proton onder uitzending van een electron volgens de vergelijking:

$$^{32}_{15}\text{P} = ^{32}_{16}\text{S} + ^{0}_{-1}\text{e}.$$

Men ziet hieruit, dat het eindproduct dezelfde stof is, die aan het begin der proef met neutronen beschoten werd.

Fermi en zijn medewerkers volbrachten nu in verloop van zeer korten tijd een bewonderenswaardig werk, door als het ware „aan den loopenden band" tal van elementen aan systematische neutronenbombardementen bloot te stellen. Zelfs bij de zwaardere elementen traden transmutaties op, waarbij radio-actieve isotopen gevormd werden van elementen, welker atoomgewicht

in de nabijheid lag van dat van het uitgangsproduct. Zij ontdekten verschillende reactietypen: in de meeste gevallen werden er, als in het gegeven voorbeeld, protonen uitgezonden, ofwel α-deeltjes of deuteronen, terwijl in andere gevallen ook stabiele isotopen ontstonden. In de onderzoekingen werden vaak chemische reacties opgenomen, van den aard, als te voren voor den fosfor aangeduid, zoodat men steeds met zekerheid wist, welk radio-actief element gevormd was. Daarentegen is men er nog nimmer met chemische methodes in geslaagd, aan te toonen, welk eindproduct door het radio-actieve element werd gevormd, doch dat kan afgeleid worden uit den aard der uitgezonden straling. Door het gebruik van een telbuis was men bovendien in staat, vast te stellen, hoe snel de sterkte der straling afnam, zoodat men voor alle radio-actieve isotopen den juisten halveeringstijd kan opgeven.

Het gebruik van neutronen tot het teweeg brengen van kunstmatige radio-activiteit oogstte dus een volkomen succes, en de methode werd dan ook dadelijk overgenomen door alle laboratoria waar men in het gelukkige bezit was van de benoodigde hoeveelheid α-stralen uitzendende praeparaten. Tot de snelle verbreiding der werkwijze droeg eveneens bij de omstandigheid, dat de experimenten bijna even gemakkelijk uit te voeren waren als gewone natuurkundige schoolproeven. Om de kunstmatige radio-activiteit te demonstreeren, behoeft men slechts een stukje zilver in de hand te nemen en dit een paar minuten kort bij de neutronenbron te houden; het wordt dan zóó sterk radio-actief, dat men, door het in de nabijheid te brengen van een met een luidspreker verbonden telbuis, een waar snelvuur te hooren krijgt van de tikken, door de

electronen veroorzaakt. Na verloop van eenige minuten bemerkt men duidelijk, dat de tikken minder frequent worden, en wanneer men tellingen verricht, is het zoodoende gemakkelijk, den halveeringstijd te bepalen. Voor zilver bedraagt deze 24 minuten. Het eenige bezwaar is, dat men over een tamelijk krachtig radiumpraeparaat moet beschikken om voldoende neutronen vrij te maken. De neutronen zelf hebben immers hun ontstaan te danken aan een kernsplitsingsproces, dat zich slechts betrekkelijk zelden voordoet, daar niet meer dan een fractie der α-stralen van het praeparaat met kernen in botsing komt. Met een radiumpraeparaat van $^1/_{10}$ gram, dat 10^{10} α-deeltjes per seconde uitzendt, kan men hoogstens 10^5 neutronen per seconde produceeren.

De in de practijk gebruikte neutronenbronnen bestaan òf uit het zuivere radiumzout (radiumsulfaat), zorgvuldig gemengd met zeer fijn verdeeld beryllium en ondergebracht in een dichtgesmolten glazen buisje, òf wel, wanneer men beschikt over een in water opgelost radiumpraeparaat, uit een glazen buis, inhoudende berylliumpoeder en gasvormige radiumemanatie, die men uit de radiumoplossing kan winnen. De laatste methode verschaft wat meer neutronen, maar heeft het bezwaar, dat men geregeld de emanatievulling moet vernieuwen, aangezien de halveeringstijd daarvan nog niet ten volle 4 dagen bedraagt.

Dat met de proeven van Fermi, ondanks het betrekkelijk geringe aantal der neutronen, toch zoo talrijke elementenmutaties bereikt werden, is te danken aan het groote doordringingsvermogen der neutronen, die zelfs voor de kernen der zware atomen niet terugdeinzen. Ten slotte slaagden Fermi en zijn medewerkers er in, een methode uit te vinden, die voor bepaalde processen de kernsplitsende eigenschap der neutronen vele malen sterker maakte, zoodat het resultaat van een bestraling tot 40 maal zoo groot werd. Hiertoe werden

zoowel de neutronenbron als de stof, die bestraald moest worden, omgeven door een dikke laag paraffine of water. Daar deze stoffen zeer vele waterstofatomen bevatten, verklaart men de versterkte werking, door aan te nemen, dat de neutronen door herhaalde botsingen met waterstofkernen een groot deel hunner snelheid verliezen, en dat de aldus gevormde trage neutronen gemakkelijk kernprocessen teweeg brengen. Dat het voornamelijk waterstofrijke stoffen zijn, die in staat zijn, neutronen te vertragen, is toe te schrijven aan de omstandigheid, dat protonen en neutronen even zwaar zijn, hetgeen medebrengt, dat een neutron na iedere botsing gemiddeld de helft van zijn bewegingsenergie verliest, zoodat het na betrekkelijk weinige botsingen nog slechts een fractie daarvan heeft behouden.

Het doet op het eerste gezicht merkwaardig aan, te constateeren, dat de langzame neutronen werkzamer zijn dan snelle wat betreft de inwerking op de kernen; van geladen deeltjes als de α-deeltjes en protonen is men immers gewend, dat hun effect toeneemt naar mate hun snelheid grooter is. Echter zijn de kernprocessen, waarbij het nuttig effect grooter wordt door de neutronen te vertragen, van een bijzonderen aard: er vindt namelijk geen eigenlijke kernsplitsing plaats, doch eerder een opbouw, aangezien het neutron door de kern gevangen gehouden wordt. Daarbij wordt, hetzij een radio-actieve, hetzij een stabiele isotoop gevormd van hetzelfde element onder toename van het atoomgewicht met 1. Is de gevormde isotoop stabiel, dan gaat het gevangennemingsproces in den regel gepaard met de uitzending van een quant γ-straling, waarvan de energie gelijk is aan de bindingsenergie tusschen het neutron en de oorspronkelijke kern.

Het eenvoudigste voorbeeld van zulk een binding is de vorming van zware waterstofkernen door de opname van neutronen door protonen, hetgeen, blijkens proeven, geschiedt onder de uitzending van γ-stralen met een energie van 2.2 millioen Volt. Dit proces, dat uitgedrukt kan worden door de vergelijking:

$$_{1}^{1}\mathrm{H} + _{0}^{1}\mathrm{n} = _{1}^{2}\mathrm{H},$$

is dus het omgekeerde van het op pagina 157 vermelde kern-photo-effect in zware waterstof, en geschiedt het gemakkelijkst, wanneer de neutronen traag genoeg zijn. Wanneer men een neutronenbron omgeeft door water of paraffine, zullen de neutronen eerst trager gemaakt worden door botsingen met protonen en daarna door deze vast gebonden worden. Aangenomen, dat de water- of paraffinelaag dik genoeg is, zal het uiteindelijk lot van ieder neutron zijn, door een proton te worden gebonden. Hierin is ook de verklaring gelegen van het feit, dat de physici dikke lagen water of paraffine gebruiken om toestellen of menschen tegen de neutronen te beveiligen. Wanneer zij in groote hoeveelheden optreden, zijn de neutronen voor het menschelijk organisme namelijk minstens even gevaarlijk als de stralen der radio-actieve stoffen.

Het zou ons te ver voeren, hier omstandig in te gaan op de talrijke kernprocessen, waarmede de ontdekkingen van het echtpaar Joliot-Curie en Fermi de natuurkunde verrijkt hebben; wij zullen ons moeten bepalen tot de genoemde reacties als typische voorbeelden van eenige der belangrijkste processen. Daarentegen mogen wij dit interessante gebied der physica niet verlaten zonder te vermelden, dat men reeds belangrijke practische toepassingen voor de kunstmatige radio-activiteit

heeft gevonden. In het bijzonder heeft men getracht, deze stoffen te gebruiken bij biologische en physiologische onderzoekingen volgens een werkwijze, die te danken is aan den Hongaar G. von Hevesy, en die de indicatormethode genoemd wordt. Het principe daarvan berust op het gebruik van radio-actieve isotopen als indicateurs voor de correspondeerende, stabiele isotopen, aangezien zij gemakkelijk aangetoond kunnen worden door haar straling, ook indien slechts weinige atomen aanwezig zijn. Men is dus, om zoo te zeggen in staat, afzonderlijke atomen te merken, zoodat men ze altijd herkennen kan tusschen ontelbare andere, evenals men geringde trekvogels kan herkennen en zoo hun vlucht nasporen.

Het is vooral de door neutronbestraling gevormde fosfor-isotoop $^{32}_{15}$P, die op grond van haar betrekkelijk langen halveeringstijd als indicator wordt gebruikt. Men kan langs dien weg bijvoorbeeld de omzettingen van fosfor in dierlijke organismen bestudeeren; men geeft daartoe het proefdier een fosforpraeparaat in, waaraan een minimale hoeveelheid radio-actieve fosfor is toegevoegd. Daar deze isotoop den natuurlijken fosfor bij alle chemische reacties in het lichaam zal volgen, en steeds in dezelfde mengverhouding, behoeft men slechts met een telbuis de radio-activiteit van verschillende organen of van de uitscheidingsproducten na te gaan, om te weten te komen, hoe snel en in welke hoeveelheden de fosfor over het organisme verdeeld werd. Met deze methoden heeft men reeds thans omvangrijke gegevens verzameld aangaande de verdeeling over en de opname door verschillende weefsels van fosfor en andere stoffen.

De indicatormethode was reeds lang vóór de ontdekking der kunstmatige radio-activiteit uitgewerkt en in gebruik voor natuurlijke radio-actieve stoffen, doch deze toepassing bleef beperkt tot stoffen als bismuth en lood, die natuurlijke radio-actieve isotopen bezitten. Naar alle waarschijnlijkheid zal de indicatormethode ook van beteekenis worden in de chemische techniek, aangezien het ook mogelijk is, van de meeste metalen radio-actieve isotopen te vormen.

De techniek der atoomsplitsing

De grootte van het arbeidsgebied, dat geopend is door de ontdekking der kunstmatige radio-activiteit en de groote verwachtingen, die men mag koesteren van het practische gebruik daarvan, hebben er toe geleid, dat men pogingen in het werk is gaan stellen, radio-actieve isotopen langs geheél kunstmatigen weg te vormen, dus zelfs zonder het gebruik van α-stralen of van neutronen, daardoor voortgebracht. Deze pogingen beoogen, het resultaat der kernprocessen quantitatief te verbeteren, daar de beide thans beschreven methodes afhankelijk zijn van de sterkte der radio-actieve praeparaten, die men tot zijn beschikking heeft. Het principe van deze methodes is geheel hetzelfde als dat, gevolgd door Cockcroft en Walton bij hun eerste pogingen tot kernsplitsingen, namelijk het versnellen van deeltjes door middel van de hoogste, beschikbare electrische spanningen. De meest directe methode bestaat uit het bouwen van een hoogspanningsinstallatie, die ten minste 1 millioen Volt moet kunnen voortbrengen, en daarna deze spanning aan te leggen op een ontladingsbuis, waarin de deeltjes versneld zullen worden. In de laatste jaren heeft de techniek in deze richting zoo-

danige vorderingen gemaakt, dat men thans betrekkelijk gemakkelijk hoogspanningsinstallaties kan construeeren, die de benoodigde spanning bij een stroomsterkte van eenige milli-Ampères leveren.

Voor het voortbrengen dier hooggespannen gelijkstroomen worden twee methodes gevolgd: de eene daarvan gaat uit van wisselstroom, die tot de gewenschte spanning opgetransformeerd wordt, waarna men hem gelijkricht met behulp van een kwikdampgelijkrichter, die den stroom slechts in één richting doorlaat, zoodat een pulseerende gelijkstroom wordt gevormd. De installatie pleegt nog eenige condensatoren te omvatten, die tot taak hebben, wisselingen van den stroom, die na de gelijkrichting nog mochten optreden, te verminderen. Dergelijke inrichtingen kunnen, naar gebleken is, bedrijfszeker tot 1 millioen Volt bij tot 10 milli-Ampère leveren. Figuur 33, Plaat X brengt zulk een hoogspanningsinstallatie met haar gelijkrichter in beeld. Boven de eigenlijke apparatuur, die 8 meter hoog is, ziet men twee groote koperen bollen met een diameter van 1 m; deze dienen tot het meten der spanning, waartoe men de bollen, welker onderlinge afstand instelbaar is, zoover van elkaar plaatst, dat juist vonken overspringen.

De andere methode voor het opwekken der hoogspanning, die uitgewerkt is door den Amerikaan Van de Graaf, is van geheel anderen aard: zij berust op hetzelfde principe als de ouderwetsche electriseermachines, die in het natuurkundelokaal van iedere school worden aangetroffen. De hooge spanning wordt bereikt, doordat men steeds opnieuw electrische ladingen overbrengt op een geleider, die geïsoleerd is, zoodat zij niet kunnen ontwijken. Terwijl men bij de

schoolapparaten de ladingen overbrengt op een glazen of ebonieten schijf, die rondgedraaid wordt, gebruikt men in het toestel van Van de Graaf lange en breede banden of riemen van zijde, die over twee riemschijven loopen. Een daarvan is op den vloer geplaatst, waar de riem met electriciteit geladen wordt, terwijl de andere in den genoemden geleider geplaatst is, die den vorm van een hollen kegel heeft, en geïsoleerd geplaatst is verscheidene meters boven den vloer. Naar mate de kogel hoogere en weer hoogere spanningen aanneemt, is er meer en meer energie noodig, den riem te doen bewegen tegen de afstootende krachten, die van den metalen kogel uitgaan. Bij het grootste der apparaten van dezen aard, dat in 1936 in Amerika voltooid werd, bereikte men de ongekende spanning van 5 millioen Volt bij een sterkte van 3–4 milli-Ampère. Figuur 34, Plaat X, brengt een iets kleinere apparatuur in beeld, die door de Noren Tuve, Hafstad en Dahl, reeds gedurende verscheidene jaren gebruikt is voor hun kernsplitsingsproeven in Amerika. De metalen kogel en de riemen ziet men bovenaan, terwijl de lange, loodrecht geplaatste buis in het midden de ontladingsbuis is, waarin de ionen versneld worden. De buis gaat door den vloer naar de ondergelegen verdieping, waar de bestraling wordt uitgevoerd. Voor beide typen van hoogspanningsinstallaties geldt als eisch, dat de afstand tot de muren zeer groot gehouden moet worden, daar vonken van verscheidene meters lengte bij zulke hooge spanningen niet zeldzaam zijn.

Het technische probleem, hoogspanningsinstallaties te construeeren, die een stroom van voldoende hooge spanning en sterkte leveren om kernsplitsingen teweeg te brengen, kan als opgelost worden beschouwd. De

grootste moeilijkheid is echter het ontwerpen van ontladingsbuizen, die bij deze spanningen bedrijfszeker zijn. Zij worden van glas of porselein gemaakt en moeten zeer groote afmetingen hebben, wil men voorkomen, dat vonken langs den buitenkant overspringen. Aan het uiteinde van de eigenlijke acceleratiebuis, waarin het vacuum door regelmatig uitpompen der lucht zooveel mogelijk onderhouden wordt, brengt men de ionenbron aan, die de benoodigde waterstof- of heliumionen levert, welke daarna in de acceleratiebuis de met de hooge spanning overeenkomende groote energie opnemen. Aan het benedeneinde der buis worden de stoffen geplaatst, die aan het deeltjesbombardement worden blootgesteld, alsmede de noodzakelijke pompen en registeeringstoestellen als nevelkamers, telbuis, enz. De hoogste spanningen, waarmede men tot nu toe in zulk een buis gewerkt heeft, bedragen ongeveer 1 millioen Volt, doch de sterkte laat nog wel te wenschen over, daar men niet veel boven ongeveer $^1/_{10}$ milli-Ampère is uitgekomen.

Hoewel zulk een modern electronenkanon, bestaande uit de hoogspanningsinstallatie met bijbehoorende meterslange ontladingsbuis er hoogst indrukwekkend uitziet, en ook inderdaad zeer bevredigende resultaten kan geven, wordt het in zijn prestaties toch overtroffen door een toestel, dat het vorige jaar door den Amerikaan Lawrence is geconstrueerd. De gedachte, die aan zijn constructie ten grondslag ligt, bestaat daaruit, dat men de deeltjes niet éénmaal aan de hooge spanning bloot stelt, doch ze geleidelijk versnelt, door ze een betrekkelijk lage spanning vele malen achtereen te doen doorloopen. Het apparaat, dat een cyclotron wordt genoemd, bestaat in de eerste plaats uit een enormen

magneet, die tot taak heeft, de geladen deeltjes af te buigen, zoodat zij cirkelbanen gaan beschrijven met een straal, die grooter wordt, naar mate hun snelheid toeneemt. Deze ontvangen zij door aantrekking en afstooting door twee electroden, die tusschen de polen van den electromagneet zijn aangebracht op een wijze, als schematisch is aangegeven in figuur 35. Men moet zich daarbij voorstellen, dat de polen onder en boven het

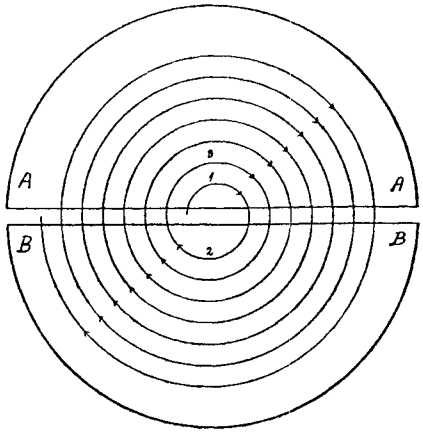


Fig. 35. Schematische voorstelling van den gang der deeltjes in een cyclotron

papier gelegen zijn. De electroden, die in werkelijkheid hol zijn, hebben den vorm van een ledig schoensmeerdoosje, dat dwars doorgesneden is; de afmetingen zijn echter grooter, daar de middellijn in den regel bijna 1 meter bedraagt. Midden tusschen de electroden is de ionenbron aangebracht; de daardoor geleverde ionen bezitten in den aanvang slechts een geringe snelheid, zoodat zij door den magneet afgebogen worden in een baan met zeer geringen straal. Wanneer zulk een positief ion de holte in de electrode A doorloopen heeft,

dus een baan heeft beschreven, die in de afbeelding met 1 is gemerkt, zorgt men er voor, dat A positief en B negatief is geladen, zoodat het ion in de ruimte tusschen A en B een verhoogde snelheid krijgt, overeenkomende met het spanningsverschil tusschen A en B. Het ion zal nu een iets grooteren halven cirkel beschrijven in de electrode B. Terwijl het zich daarin bevindt, zorgt men er voor, de spanning op de electroden om te keeren, zoodat B positief en A negatief geladen is, wanneer het ion in de tusschenruimte aankomt. Daardoor zal het ion opnieuw een snelheidsvermeerdering ondergaan bij den overgang van de eene electrode naar de andere, zoodat de halve cirkel 3 weer grooter wordt, enz.

Op deze wijze zet het ion zijn weg voort, met steeds stijgende snelheid een spiraalvormige baan beschrijvend, die opgebouwd is uit steeds grooter wordende halve cirkels, tot het den rand der electrode bereikt heeft, waar het uit het magnetisch veld getrokken wordt door een afzonderlijke electrode, die niet op de teekening is aangegeven. De vereischte wisselende spanning voor de electroden wordt verkregen van een wisselstroomgenerator, waarvan de stroom ongeveer 20 millioen maal per seconde van richting verandert. Een wisselstroom met zoo hooge frequentie kan niet voortgebracht worden door een gewonen generator, zoodat men daartoe een kortegolfzender gebruikt. Het genoemde trillingsgetal van 20 millioen Hertz (20.000 kilo-Hertz) komt overeen met electromagnetische golven met een golflengte van 15 meter; de zender kan dus van hetzelfde type zijn als die, welke voor de kortegolf-radiophonie worden gebruikt. Voorwaarde, dat de cyclotron volgens zijn bestemming zal werken

bij het gebruik van zulk een wisselstroom met constant trillingsgetal, is, dat het ion precies denzelfden tijd noodig heeft om de banen 1, 2, 3, enz. te doorloopen. Gelukkig is de natuur zoo tegemoetkomend, er voor te zorgen, dat deze voorwaarde vervuld is. Wel is waar is baan 1 kleiner dan baan 2, maar als compensatie loopt het ion in 1 langzamer dan in 2, en een nauwkeurige berekening toont aan, dat deze twee factoren elkaar opheffen, zoodat de omloopstijd van een bepaald ion onafhankelijk is van zijn snelheid en slechts afhangt van de sterkte van den magneet. Men behoeft dus die sterkte slechts af te stemmen op de frequentie van den kortegolfzender, zoodat het ion een der halve cirkels in den juisten tijd doorloopt, om te bereiken, dat dit tevens met alle andere banen het geval zal zijn. Legt men aan de electronen nu een spanning van 50.000 Volt aan, en passeert het ion 100 maal de tusschenruimte tusschen de electroden, dan zal het een snelheid hebben bereikt, die even groot is als wanneer het ineens een spanning van 5 millioen Volt had doorloopen. Doordat bij de electronen nergens hoogere spanningen dan 50.000 Volt voorkomen, ontgaat men alle moeilijkheden, die aan het gebruik van millioenen-spanningen verbonden zijn.

Hoe ongeloofelijk het ook moge klinken, Lawrence en zijn medewerkers slaagden erin, zulk een cyclotron te doen functionneeren, al kostte dat ook de inspanning van vele jaren en eischte het een maximum aan technisch kunnen. Eerst moest men den genoemden enormen magneet samenstellen, die, behalve dat hij de vereischte sterkte bezit, ook zoodanig moet zijn ingericht, dat tusschen de polen plaats is voor de electroden en al de noodzakelijke hulpapparaten. Lawrence slaagde er

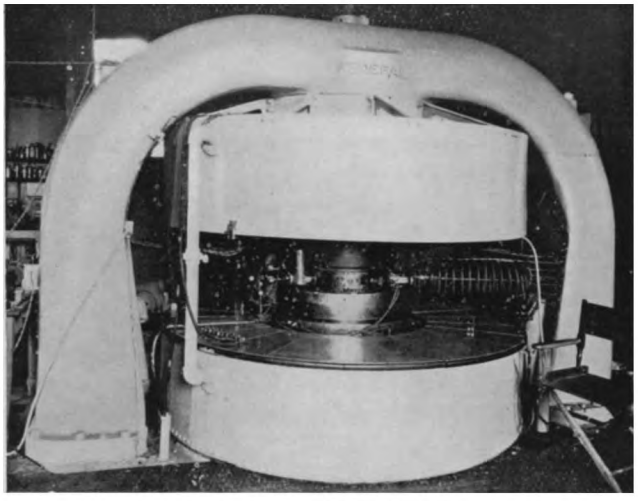


Fig. 36. De cyclotron van Lawrence; de reusachtige afmetingen blijken uit een vergelijking met den stoel rechts.

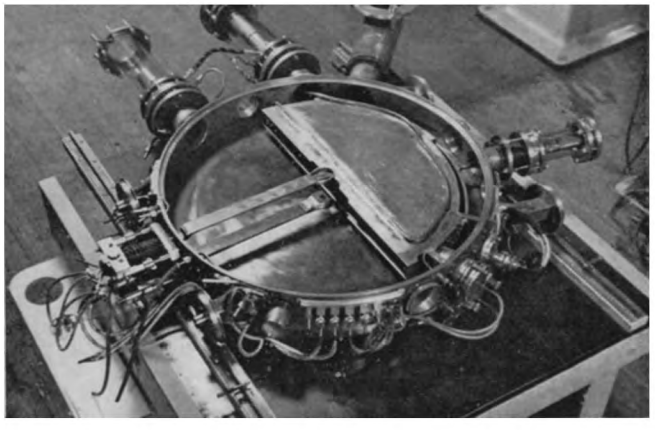


Fig. 37. Het inwendige der cyclotron. De diameter bedraagt 70 cm.

PLAAT XII

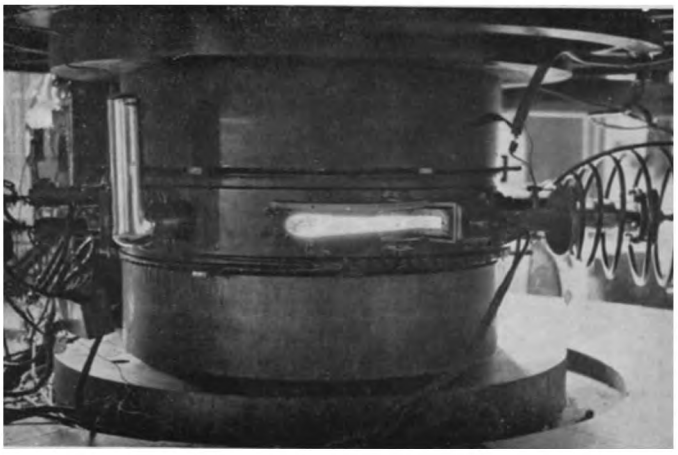


Fig. 38. De cyclotron in werking. De lichtende straal in het midden bestaat uit deuteronen, die een snelheid bezitten, overeenkomende met 6 millioen Volt.

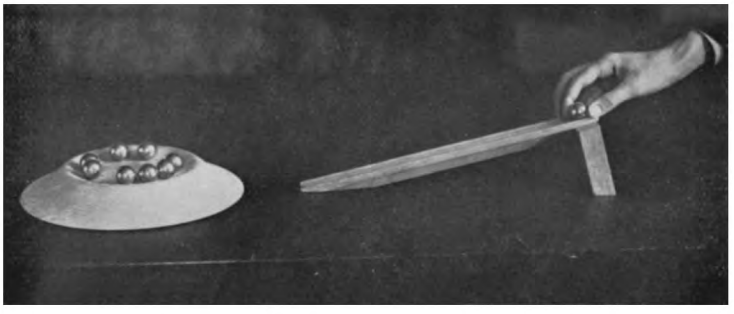


Fig. 39. Model ter illustreering van een atoomkernbombardement met snelle deeltjes.

in, een grooten electromagneet te bemachtigen van een zoogenaamden Poulsen-generator, die vroeger veel gebruikt werd bij de radio-telegraphie, doch in onze dagen plaats heeft moeten maken voor den modernen lampzender. Het acceleratiesysteem, bestaande uit electroden, ionenbron enz. werd nu aangebracht in een metalen doos, die luchtledig gepompt en gemakkelijk in- en uitgeschoven kon worden tusschen de magneetpolen, zoodat men vlug de veranderingen kon aanbrengen, die de proeven eischten. Figuur 36, Plaat XI, toont Lawrence's cyclotron, waar men tusschen de twee reusachtige spoelen van den magneet en de poolschoenen, die een diameter hadden van 70 cm, de metalen doos ziet geplaatst. Op figuur 37, Plaat XI, ziet men de doos uit den magneet genomen, zoodat men de vele electrode-toevoerleidingen, pompbuizen, enz. kan onderscheiden. Een van de twee holle electroden is verwijderd, zoodat de tweede beter zichtbaar wordt. Figuur 38 van Plaat XII ten slotte is een close-up van de werkende cyclotron, waarbij een straal snelle ionen uit een venstertje komt. Zoo groot is de energie van dien straal, dat de doordringingsafstand in lucht ongeveer $^1/_2$ meter bedraagt, hetgeen duidelijk zichtbaar wordt, doordat de lucht binnen het stralingsbereik zoo sterk geïoniseerd wordt, dat zij een krachtig lichtverschijnsel uitzendt.

De kernsplitsingsmethode van Lawrence is stellig voor het oogenblik de meest effectieve werkwijze; zoowel bij het gebruik van protonen en heliumionen, als van deuteronen, heeft men kernreacties weten te bereiken van een voordien ongekend formaat. Wel is waar bezitten de stroomen, die men ter beschikking kreeg, maximaal slechts ongeveer $^1/_{10}$ van de sterkte van die der ontladingsbuizen, maar de resultaten zijn niettemin

frappant. In het bijzonder bij het gebruik van deuteronen, die, naar gebleken is, bij vele processen de beste projectielen vormen, heeft men snelheden weten te bereiken, die overeenkomen met een spanning van 6 millioen Volt, terwijl een aantal van 4×10^{13} dezer deeltjes per seconde in de cyclotron hun geweldige snelheid ontvingen. In 1937 slaagde men er in Amerika in, ook met dubbelgeladen heliumatomen, dus zuivere heliumkernen, te werken en daardoor kunstmatige α-deeltjes voort te brengen, welker snelheid met een spanning van 12 millioen Volt overeenkomt, en bovendien in hoeveelheden, die vele duizenden malen grooter zijn dan men met gewone radio-actieve praeparaten kan bereiken. Wanneer men daarbij in overweging neemt, dat een cyclotron vermoedelijk niet veel meer zal kosten dan 1 gram radium, dus ongeveer *f* 80.000, terwijl zij duizenden malen méér α-deeltjes produceert, die bovendien nog veel en veel meer energie bevatte, dan is het gemakkelijk te begrijpen, dat de cyclotron een uitvinding is, die een goede toekomst voor zich heeft. Zoowel in Amerika als in Europa worden dan ook in verscheidene physische laboratoria cyclotronen gebouwd of heeft men ze juist voltooid.

De hier beschreven installaties, die allengs de physische laboratoria in machinekamers hebben herschapen, hebben reeds zoovele en zoo verschillende elementmutaties mogelijk gemaakt, dat de resultaten spoedig dikke folianten kunnen vullen. Wij zullen ons intusschen moeten beperken tot een bespreking van enkele der merkwaardigste experimenten, zooals bijvoorbeeld de beschieting van zware waterstof met deuteronen. Door bijvoorbeeld een stukje „zwaar ijs", dat wil zeggen ijs, dat gemaakt is door het bevriezen van zwaar

water, met snelle deuteronen te bombardeeren, krijgt men twee geheel verschillende reacties, waarvan één uitgedrukt kan worden door de formule:

$$_{1}^{2}\mathrm{H} + _{1}^{2}\mathrm{H} = _{1}^{3}\mathrm{H} + _{1}^{1}\mathrm{H}.$$

Er wordt dus een gewoon proton gevormd, benevens een waterstofkern met massa 3, die vóórdien niet bekend was, doch waarvan het bestaan vastgesteld werd uit nevelkameropnamen. Deze waterstofisotoop, welker kern dus moet bestaan uit 1 proton en 2 neutronen, is, hoewel zij hoogstwaarschijnlijk stabiel is, nog niet in de natuur aangetoond. Het bedoelde proces is zoo bijzonder merkwaardig, omdat alle deelnemende deeltjes kernen van hetzelfde element zijn, zij het dan van drie verschillende isotopen. Bovendien constateerde men bij dezelfde proef, dat de reactie vaak op een geheel andere wijze verloopt, die is uit te drukken door de vergelijking:

$$_{1}^{2}\mathrm{H} + _{1}^{2}\mathrm{H} = _{1}^{3}\mathrm{H} + _{0}^{1}\mathrm{n},$$

waarbij eveneens een voordien onbekende isotoop optreedt, namelijk de heliumisotoop He, welker kern bestaat uit twee protonen en 1 neutron. Bovendien wordt een groot aantal neutronen uitgezonden, zoodat het proces dadelijk dienst kan doen als neutronenbron.

Een ander belangrijk kernproces, dat, in tegenstelling met het zooeven beschrevene, gereserveerd is gebleven voor de cyclotron, is de beschieting van beryllium met deuteronen, waarbij men eveneens een zeer krachtige neutronenuitzending verkrijgt, terwijl tevens de boriumisotoop $_{5}^{10}\mathrm{B}$ gevormd wordt zooals blijkt uit de vergelijking:

$$_{4}^{9}\mathrm{Be} + _{1}^{2}\mathrm{H} = _{5}^{10}\mathrm{B} + _{0}^{1}\mathrm{n}.$$

Dit proces heeft groote toepassing gevonden ter vervanging van de gewone neutronenbron: het is de beste methode ter productie van neutronen, waarover men beschikt. Bij het gebruik van deuteronen met een snelheid, overeenkomende met een spanning van 5–6 millioen Volt en een stroomsterkte van slechts $^1/_{100}$ milli-Ampère, heeft men een productie bereikt van niet minder dan 10^{10} neutronen per seconde, hetgeen evenveel is als een gewone neutronenbron, die 10 kilogram radium bevat, zou kunnen leveren. Dit is wel een van de meest overtuigende voorbeelden van den vooruitgang, die de cyclotron gebracht heeft, daar de totale hoeveelheid op de aarde gewonnen radium beneden 1 kilogram blijft.

Bij zulke geweldige hoeveelheden neutronen wordt het probleem van de bescherming der experimentators tegen de schadelijke werking der neutronen in hooge mate actueel. Daar het menschelijk lichaam voor het grootste gedeelte uit water bestaat, zullen de neutronen bij botsing met de protonen, die voorkomen in de watermoleculen, den weefsels daarvan groote hoeveelheden energie mededeelen, die funest kunnen werken op grond van haar ioniseerend effect. Bij het werken met kunstmatige neutronenbronnen, hetzij die nu door hoogspanningsinstallaties of door cyclotronen gevormd worden, bouwt men daarom dikke barricaden, bestaande uit met water gevulde blikken, en zorgt men, zoover van de neutronenbron verwijderd te blijven als slechts mogelijk is.

De geweldige hulpmiddelen, waarover de atoomphysica vooral met de cyclotron de beschikking heeft verkregen, zijn uit den aard der zaak nog lang niet ten volle uitgebuit. Toch heeft men reeds alle kern-

reacties uitgevoerd, die voordien met behulp van α-deeltjes of neutronen waren bewerkstelligd en bovendien vele nieuwe processen tot stand gebracht, die onder andere de vorming van verscheidene radio-actieve elementen medebrachten. Het aantal van kunstmatig tot stand gebrachte radio-actieve isotopen bedraagt reeds over de 200, dus ongeveer evenveel als er stabiele isotopen bekend zijn, ongeacht de circa 50 bekende natuurlijke radio-actieve isotopen. Bij elkaar zijn dus over de 500 isotopen der ongeveer 90 verschillende elementen bekend, hetgeen neerkomt op gemiddeld ruim 5 isotopen per element.

Hoewel dus de droom der oude alchimisten, het eene element in het andere om te zetten, in onze dagen in vervulling is gegaan in verschillende, over de geheele aarde verspreide laboratoria, hoort men nog vaak de triviale vraag, of men nu ook goud kan maken. Aangezien dit element uit physisch oogpunt allerminst een bijzondere plaats inneemt tusschen de andere elementen, ligt het voor de hand, dat ook processen bekend zijn, waarbij goud gevormd wordt, zoowel in radio-actieve als in stabiele isotopen. Aangezien aangenomen mag worden, dat de stellers der vraag aangaande de mogelijkheid van „goud maken" de meeste belangstelling zullen hebben voor de stabiele isotoop, zij hier het geheim der bereidingswijze ontsluierd: men neme een stuk platina, bestrale het eenige uren met snelle deuteronen van een cyclotron, waarbij de volgende reactie plaats vindt:

$$^{196}_{78}\mathrm{Pt} + {}^{2}_{3}\mathrm{H} = {}^{197}_{78}\mathrm{Pt} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}.$$

De aldus gevormde platina-isotoop $^{197}_{78}$ Pt is radio-actief; met een halveeringstijd van 15 dagen gaat zij

onder uitzending van electronen in het begeerde goud over volgens de vergelijking:

$$^{197}_{78}\,\mathrm{Pt} = {}^{197}_{79}\,\mathrm{Au} + {}^{-1}_{3}\,\mathrm{e}.$$

De methode mag echter niet rendabel genoemd worden, daar de productie, ondanks de geweldige, regelmatig vele kilowatts verslindende apparatuur der cyclotron, ongeveer 1 gram per 10^{10} jaar zou bedragen. Maar zelfs als het gelukte, door toekomstige verbeteringen de productie zeer aanzienlijk te verhoogen, zou geen physicus of chemicus zijn goede platina, dat nuttige metaal, dat in laboratoria en industrie zulk een uitgebreide toepassing vindt, willen omzetten in het weinig bruikbare goud.

Een andere meer verstandige vraag, die den mannen der moderne atoomphysica vaak voorgelegd wordt, is deze, of het nu ook mogelijk is, kunstmatig radium te maken. Hoewel het antwoord hierop nog ontkennend moet luiden, klinkt het toch ook hoopvol, aangezien men wel vervangingsmiddelen kan vervaardigen, die in bepaalde gevallen even goed als, of zelfs beter zijn dan het natuurlijke radium. Het is namelijk uitsluitend zijn straling, waaraan het radium zijn waarde ontleent, en men is thans in staat, kunstmatige radioactieve stoffen te bereiden in zulke hoeveelheden, en met zoodanig stralingseffect, dat concurrentie met radium voor medische doeleinden reeds mogelijk is. De belangrijkste dezer radium-surrogaten is de radioactieve natriumisotoop $^{24}_{11}\,\mathrm{Na}$, die op verscheidene wijzen bereid kan worden, en bij haar desintegratie bij een halveeringstijd van 15 uur zoowel β- als γ-stralen uitzendt met een energie van een paar millioen Volt. Met behulp van de cyclotron heeft men dit radio-actieve

natrium in zulke hoeveelheden bereid, dat men dezelfde γ-stralings-intensiteit verkrijgt als met een radium-praeparaat van 1 gram, dat in de medische wetenschap reeds als een zéér sterk praeparaat geldt. In ieder geval kan men zeggen, dat de imponeerende ontdekkingen der allerlaatste jaren nieuwe en nog spannender avonturen in het vooruitzicht stellen, toe te voegen aan de reeds 40 jaar oude, romantische geschiedenis van het element radium.

Kerntheorie en atoomenergie

De in het vorige hoofdstuk beschreven nieuwe ontdekkingen zijn alle van zuiver experimenteelen aard, en hoewel zij slechts enkele jaren oud zijn, hebben zij reeds zulke hoeveelheden materiaal opgehoopt, dat het tijdstip rijp schijnt, waarop door theoretische beschouwingen een dieper inzicht in den bouw der atoomkernen verworven kan worden.

Als voorloopig resultaat aangaande de structuur der kernen, waartoe de nieuwste onderzoekingen geleid hebben, kan genoemd worden de wetenschap, dat kernen opgebouwd zijn uit protonen en neutronen. Het bewijs daarvan mag beschouwd worden als te zijn geleverd ten deele door het feit, dat men bij kernsplitsingen zoowel protonen als neutronen uit de kern verkreeg, deels door de omstandigheid, dat alle atoomgewichten weinig afwijken van geheele veelvouden van het gewicht van protonen en neutronen. Wel is waar hebben uiterst nauwkeurige massaspectrographische onderzoekingen aan het licht gebracht, dat de atoomgewichten der isotopen kleine afwijkingen van geheele getallen vertoonen in dien zin, dat het gewicht van een bepaalde atoomkern altijd een weinig minder bedraagt

dan het totale gewicht der samenstellende protonen en neutronen, doch deze bevinding houdt geenszins in, dat er een fout zou schuilen in de hypothese aangaande den bouw der kernen. Integendeel, zij levert juist een bewijs voor de juistheid, aangezien de afwijkingen dáárop berusten, dat de kernen, toen zij in een ver verleden opgebouwd werden, een aanzienlijke hoeveelheid energie hebben uitgestraald, overeenkomende met de bindingsenergie der deeltjes, en daar Einstein ons geleerd heeft, dat massa slechts een energievorm is, brengt zulk een energieverlies ook een massaverlies mede. Men berekent de grootte dier bindingsenergie door het massaverlies te vermenigvuldigen met het kwadraat van de lichtsnelheid.

Dat men er in het dagelijksch leven weinig van bemerkt, dat massa en energie op deze wijze nauw verbonden zijn, berust op de omstandigheid, dat zelfs de grootste hoeveelheden energie, die men aan een lichaam kan toevoegen, of daaraan ontnemen, zulke uiterst kleine veranderingen in haar massa teweegbrengen, dat het ten eenen male onmogelijk is die door weging vast te stellen. Bij het verwarmen van 1 liter water bijvoorbeeld van 0 tot 100° C. wordt daaraan een hoeveelheid energie toegevoegd, die het water slechts 10^{-8} gram zwaarder doet zijn, een bedrag dus, dat ver beneden den nauwkeurigheidsgraad ligt, waarmede men 1 liter water kan wegen. Geheel anders liggen de verhoudingen echter bij de atoomkernen, waar de bindingsenergie tusschen de bestanddeelen zoo groot is, dat de daarmede overeenkomende massa geenszins te verwaarloozen klein is in vergelijking tot de massa der kern. Daarom werd Einsteins belangrijke voorspelling dan ook eerst bevestigd door de kern-

reacties, besproken bij de proeven van Cockcroft en Walton.

Door het verschil te bepalen tusschen de massa van een atoomkern en die van haar gezamenlijke bestanddeelen, en dat te vermenigvuldigen met de lichtsnelheid in het kwadraat, verkrijgt men, zooals wij reeds zagen, de bindingsenergie der betreffende kern. Nu pleegt men niet het absolute gewicht der kern aan te geven, doch het relatieve, waarbij het atoomgewicht van zuurstof op 16 is gesteld. De berekening leert, dat een massa van 1 atoomgewichtseenheid overeenkomt met een energie van 931 millioen electron-Volt.

Laten wij thans, gebruik makend van de nieuwste atoomgewichtsbepalingen, de hoeveelheden energie van een paar belangrijke kernen bepalen. Het nauwkeurige atoomgewicht van waterstof bedraagt 1,00813; van een neutron 1,00897. De som dezer waarden levert 2,01710, terwijl het atoomgewicht van zware waterstof 2,01473 bedraagt. Het massaverschil (gewoonlijk genoemd massadefect) bij de vorming van een deuteron uit een proton en en neutron beloopt dus 0,00237, welke waarde, vermenigvuldigd met de bovengenoemde 931, een bindingsenergie oplevert van 2,2 millioen Volt. (Vergelijk ook pagina 168).

Voeren wij dezelfde berekening uit voor een heliumkern, dan vinden wij als som der gewichten van de twee waterstofatomen en van twee neutronen, een bedrag van 4,03420, terwijl helium een atoomgewicht heeft van slechts 4,00389. Het massadefect bij de vorming van een α-deeltje beloopt dus 0,03031, hetgeen overeenkomt met een bindingsenergie van 28,2 millioen Volt.

De groote bindingsenergie der α-deeltjes beteekent,

dat de protonen en neutronen daarin zeer sterk gebonden zijn, hetgeen ook daaruit blijkt, dat de α-deeltjes uiterst stabiele kernen vormen. Kernsplitsingsprocessen, waarbij α-deeltjes gevormd worden, kenmerken zich dan ook door een groote energie-ontwikkeling, die zich manifesteert in de groote snelheid der uitgezonden α-deeltjes. Bij de splitsing van lithium door middel van protonen hebben wij hiervan een voorbeeld gezien.

Op deze wijze kan men, uitgaande van de atoomgewichten, de bindingsenergie van alle atoomkernen berekenen, dat wil zeggen, de energie, die noodig is om de kern in haar bestanddeelen te splitsen. Voor de grootere atoomkernen bereikt men voor de bindingsenergie spoedig waarden van 1–2 millioen Volt. Met behulp der bindingsenergie kan men voorts gemakkelijk de energie-omzetting berekenen, die bij een kernsplitsingsproces optreedt: men behoeft slechts de massa der deelnemende atomen vóór de reactie te vergelijken met die er na. In vele gevallen is het mogelijk gebleken, evenals bij de proef van Cockcroft en Walton, de berekende hoeveelheden energie empirisch te controleeren, bijvoorbeeld door in een nevelkamer den doordringingsafstand der uitgezonden deeltjes te bepalen. In al deze gevallen heeft men een volkomen overeenstemming gevonden tusschen de theoretische en de experimenteel gevonden waarden.

Maar al hebben dergelijke overwegingen dan een ruim inzicht verschaft in de energie-omzettingen der meeste kernreacties, de natuurkundigen kunnen nog niet op hun lauweren gaan rusten. Er zijn namelijk nog vele problemen ten aanzien der atoomkernen, die om een oplossing vragen. Zoo zou men bijvoorbeeld gaarne weten, waaròm de kernreacties verloopen zoo-

àls zij verloopen, en hoe het komt, dat sommige kernen stabiel, andere radio-actief zijn. Bohrs atoomtheorie immers bleek slechts in staat, de eigenschappen van alle elementen te verklaren uit de groepeering der electronen in het atoom en iets dergelijks wenscht men zich voor de eigenschappen der isotopen.

De situatie, die zich voordoet bij het tot oplossing brengen van het probleem der kernen, is echter geheel anders dan die, waarvoor het atoomprobleem in 1913 stond, toen men zich door het aantoonen van het bestaan der atoomkernen door Rutherford bepaalde voorstellingen kon vormen over de structuur der atomen. Toen kende men namelijk reeds de electrische krachten, waarmede de bestanddeelen van het atoom elkander beïnvloeden, zoodat het vraagstuk resulteerde in het vinden van de wetten der quantenmechanica, die de interne wereld der atomen beheerschen.

Ten aanzien der kernen is de situatie min of meer omgekeerd, aangezien men mag aannemen, dat die thans bekende wetten ook gelden voor de bewegingen van de bestanddeelen der kernen, terwijl men nog niets weet van den aard der krachten, die, naar verondersteld wordt, zich tusschen die bestanddeelen doen gelden.

Men kan zich echter een grove voorstelling maken van de grootte der kernkrachten en haar werkingswijze op grond van onze kennis aangaande de bindingsenergie en de grootte der atoomkernen. Van de afmetingen daarvan kreeg men reeds een indruk door Rutherfords proef in 1911 betreffende de spreiding der α-deeltjes, die als resultaat gaf, dat de diameter van een kern in de orde van grootte van 10^{-12} cm valt. De resultaten der in de laatste jaren uitgevoerde kernbombardementen hebben deze waarde bevestigd; uit de

veelvuldigheid, waarmede projectielen van allerlei aard kernen treffen, kan men met een redelijke mate van nauwkeurigheid gevolgtrekkingen maken over de grootte der kernen. Men vond, dat de diameters der kernen van alle atomen gelegen waren tusschen de grenswaarden $^1/_3 \times 10^{-12}$ cm en 2×10^{-12} cm. Het eerst genoemde getal geeft dan den diameter van een waterstofkern aan, het tweede die der zwaarste kernen. Deze blijkt dus slechts ongeveer $6 \times$ zoo groot te zijn als die van een der bouwsteenen van de kern, het proton, dat trouwens practisch even groot is als het neutron. De inhoud der zwaarste kernen blijkt dus slechts $6^3 = 216$ maal zoo groot te zijn als die van een proton of neutron, en daar die zware kernen ook juist ruim 200 deeltjes bevatten, moeten de deeltjes in de kern dus samengepakt zijn als haringen in een ton.

Men krijgt er een beeld van, hoe sterk geconcentreerd de massa in een atoomkern is, door zich te realiseeren, dat een handvol materie, geheel uit kernen bestaande, 10^8 ton zou wegen, dus evenveel als 10.000 oceaanstoomers, wegende 10.000 ton elk. Natuurlijk is deze zware materie geheel denkbeeldig, daar onder normale omstandigheden kernen niet zoo kort bij elkaar liggen.

Men kan er zich echter ook over verbazen, dat het mogelijk is, dat de deeltjes van een atoomkern op hun plaats blijven, vooral omdat ongeveer de helft hunner positief geladen is, zoodat zij volgens de gewone natuurkundige wetten elkaar moesten afstooten. Niettemin is het een feit, dat zij op hun plaats blijven, en stevig ook, aangezien kernen opgelegd stabiel zijn, zoodat er tusschen die deeltjes geweldig groote aantrekkende krachten moeten heerschen van tot nu toe onbekenden aard, die de electrische afstooting volkomen overheerschen.

Deze krachten kunnen kennelijk slechts werken over zeer korte afstanden, namelijk ongeveer ter grootte van de afmetingen der kernen zelf, aangezien een proton, dat uit de nauwe kern bevrijd is, slechts onderhevig blijkt te zijn aan de gewone electrische afstooting. Van de grootte der bindende krachten krijgt men een beeld, wanneer men zich herinnert, dat in den regel een energie van vele millioenen electron-Volt noodig is, om slechts één der bestanddeelen van de kern buiten de werkingssfeer der kernkrachten te brengen.

De dichte samenpakking van deeltjes in de atoomkernen biedt een beeld, dat geheel verschilt van dat, hetwelk het electronensysteem der atomen oplevert, waar de afstanden der deeltjes onderling zoo groot zijn, dat er veel en veel meer ledige ruimte is dan materie. In tegenstelling met zulk een electronensysteem, dat aan de constitutie van een gas herinnert, doet de kern meer aan een vasten kogel denken of eerder aan een vloeistofdruppel, die eveneens gekarakteriseerd wordt door een sterke, onderlinge wisselwerking tusschen de samenstellende deelen. Dit gezichtspunt is kort geleden naar voren gebracht door Bohr, die in eenige belangrijke werken van 1936 en 1937 heeft aangetoond, dat men met betrekkelijk eenvoudige beschouwingen de reactie der atoomkernen in hoofdlijnen plausibel kan maken.

Ten einde aanschouwelijk te maken, wat er geschiedt, wanneer een snel deeltje met een atoomkern botst, zullen wij ons bedienen van een mechanisch model, dat ook door Bohr is gebruikt. Het bestaat, zooals blijkt uit figuur 39, Plaat XII, uit een aantal stalen kogels, geplaatst in een schaalvormige uitholling in een soort omgekeerd houten bord. De kogels stellen de protonen

en neutronen der kern voor, terwijl de rand der uitholling de grens der kern aangeeft. Het doel dier holte is, de kogels samen te houden, hetgeen bij de werkelijke atoomkernen door de aantrekkende kracht geschiedt, die de deeltjes op elkaar uitoefenen. Het hellende vlak, dat men op de afbeelding ziet, dient om den projectielen de snelheid te geven, vereischt om in de „kernen" te dringen, en komt dus in werkelijkheid overeen met een hoogspanningsapparaat.

Laat men nu een kogel van het hellende vlak rollen, terwijl de uitholling leeg is, dan zal het projectiel tegen den rand oprollen en de schaal aan de andere zijde met onveranderde snelheid verlaten. Liggen er echter andere kogels in de schaal, dan heeft de inrollende kogel kans, er een te treffen, een kans, die uit den aard der zaak grooter is, naar mate het aantal kogels toeneemt. Liggen zij zoo kort bij elkaar, dat zij elkaar raken, en de geheele schaal vullen, dan zal de inrollende kogel er zeker een treffen, en dien daardoor in beweging brengen. Deze zal op zijn beurt iets van zijn bewegingsenergie overbrengen op den naastliggenden kogel, zoodat de energie van het projectiel spoedig verdeeld is over alle kogels die daarbij in een levendige beweging gekomen zijn. Aangenomen, dat de kogels geen wrijving of anderen vorm van weerstand ondervinden, zullen zij onderling blijven botsen, tot een der buitenste toevallig zooveel energie verkrijgt, dat hij geheel tegen de helling kan oploopen en de schaal verlaten.

Iets overeenkomstigs moet bij de atoomkernen plaats grijpen: wordt een neutron of proton in de kern geschoten, dan zal dit dadelijk zijn energie met de overige partikels deelen, zoodat het projectiel spoedig geen bijzondere plaats meer inneemt tusschen de overige

deeltjes. Er is dus een nieuwe kern gevormd, bestaande uit de oorspronkelijke plus een neutron, doch voorzien van een overmaat aan energie. Zulk een kern zal in den regel slechts een beperkten levensduur hebben; wanneer toevallig een voldoend groote concentratie van energie in een der deeltjes plaats grijpt, zal dit uit de kern geslingerd worden. De veronderstelling, dat zulke meer of minder lang bestaande tusschenproducten gevormd worden bij elk kernproces, is gebleken op vele punten van groote beteekenis te zijn voor een goed begrip daarvan. Dit geldt vooral voor de zuivere opnameprocessen, waarbij een langzaam neutron, dat niet voldoende energie bezit om de kans van de latere uitzending van een deeltje erg groot te maken, door een kern vastgehouden wordt. De overvloedige energie wordt dan uitgezonden in den vorm van γ-stralen, hetgeen in het mechanische model correspondeert met een langzaam verliezen van bewegingenergie der kogels door wrijving, zoodat zij tot rust komen, zonder dat een der kogels de schaal verlaat. Bij andere kernprocessen, waar men de beschieting uitvoert met een snel neutron, gebeurt het vaak, dat het uitgezonden deeltje wederom een neutron is, doch met minder energie dan het oorspronkelijke. Dit is ook uit het model te begrijpen, aangezien de kans, dat de geheele energie weder op een enkel deeltje geconcentreerd wordt, uit den aard der zaak uiterst klein is.

Bij de theoretische behandeling der kernen kan men intusschen ook de methodes en begrippen toepassen, waarmede in de theoretische warmteleer gewerkt wordt en volgens welke de hoeveelheid warmte en de temperatuur van een lichaam niets anders zijn dan openbaringsvormen van de bewegingen der atomen of mole-

culen. In een atoomkern kunnen de bewegingen der deelen in grove trekken eveneens opgevat worden als een soort warmtebeweging, zoodat men, in plaats van den energie-inhoud der kern op te geven in millioenen Volt, dit evengoed in graden Celsius zou kunnen doen. In figuur 40 is een denkbeeldig experiment schematisch weergegeven. De bol, waarin een thermometer

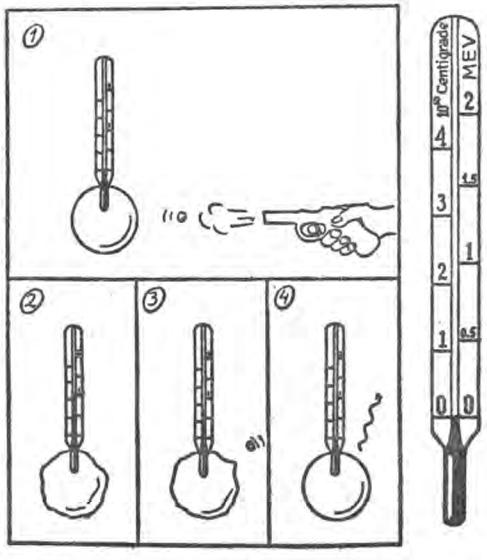


Fig. 40. Schets van de verschillende phasen van een atoomkernreactie

is gesloten, stelt een zware atoomkern voor, die beschoten wordt door een snel deeltje. De thermometer, ter zijde vergroot weergegeven, heeft twee schaalverdeelingen: op de eene kan men de energie in millioenen Volt aflezen, op de andere in graden Celsius, waarbij iedere deelstreep overeenkomt met 10^{10} graden.

Nadat de kogel in de kern geschoten is (1), ziet men

de temperatuur verontrustend hoog oploopen: de kerndeeltjes zijn in heftige beweging geraakt, hetgeen ook aangeduid wordt door het gebutste uiterlijk der kern (2). De uitzending van een deeltje (3) is een proces, dat vergeleken kan worden met de verdamping van een vloeistof, waaruit slechts de snelste moleculen gelegenheid hebben te ontwijken. Evenals de temperatuur van een vloeistof daalt bij de verdamping, brengt ook de uitzending van een snel deeltje door de kern een groote temperatuurdaling teweeg. De vergelijking gaat in zooverre mank, dat uit een vloeistof vele moleculen moeten verdampen, wil de temperatuur zoo sterk dalen, dat de verdamping ten einde komt, terwijl bij de kern de uitzending van één deeltje reeds zulk een temperatuurverlaging medebrengt, dat het daarna hoogst onwaarschijnlijk is geworden, dat zich nogmaals voldoende energie in één deeltje zou concentreeren. Gewoonlijk zal de laatste akte daarom bestaan uit het uitzenden van electromagnetische golven, tot het teveel aan energie is opgebruikt en de kern weer rustig geworden is en een vorm en temperatuur bezit als vóór het schot.

De hier gegeven simpele voorstelling verbergt onder haar schertsend uiterlijk werkelijk fundamenteele gezichtspunten aangaande de structuur der atoomkernen en de wisselwerking tusschen de deeltjes, waaruit zij zijn opgebouwd. Door deze gezichtspunten aan de orde te stellen, heeft Bohr den weg geopend voor een theoretische behandeling van het kernvraagstuk en een algemeen overzicht over de groote hoeveelheid ervaringsmateriaal, die de experimenten verschaft hebben, is daardoor reeds mogelijk geworden. Men mag verwachten, dat een voortgezette samenwerking tusschen expe-

rimenteele en theoretische atoomkernphysica in de naaste toekomst ook zal leiden tot een begrip van den aard der kernkrachten en het vraagstuk der stabiele isotopen.

Voor wij deze laatste phase van de geweldige ontwikkeling der atoomphysica verlaten, is er een probleem, dat nog om bespreking vraagt, namelijk de mogelijkheid, de enorme energie, die in de atomen besloten ligt, te bevrijden en practisch bruikbaar te maken. Men hoort bijvoorbeeld vaak de bewering, dat in een baksteen zooveel energie is opgehoopt, dat men daarmede een groote mailboot verscheidene malen den Oceaan zou kunnen doen oversteken, en dat het er slechts op aankomt, die energie toegankelijk te maken.

Ten einde na te gaan, of deze bewering juist is, dienen wij eerst vast te stellen, wat wij onder atoomenergie verstaan. Wanneer men het oog heeft op de energie, die volgens Einstein moet ontstaan, wanneer men de geheele massa van een lichaam in energie omzet, dan is het gemakkelijk, te berekenen, hoeveel energie overeenkomt met een baksteen van 1 kilogram. Men vindt dan een zoo enorm bedrag als 10^{10} paardekracht-uren, dat meer dan voldoende is, niet alleen voor het bedoelde transport over den Oceaan, maar zelfs om ons mailschip jarenlang over 's werelds zeeën te laten zwalken. Wij zouden dus practisch over onbeperkte hoeveelheden energie kunnen beschikken, indien slechts zulk een volkomen omzetting van massa in energie mogelijk ware, waarop echter weinig kans is. Wel heeft men juist in de laatste jaren beleefd, dat zulke omzettingen onder bepaalde omstandigheden plaats kunnen vinden; men denke slechts aan het verschijnsel, besproken in het hoofdstuk over de ontdekking der positronen, dat een

electron en een positron kunnen verdwijnen onder vorming van een hoeveelheid stralingsenergie als met hun massa overeenkomt, doch dit fenomeen zal helaas niet als energiebron gebruikt kunnen worden, aangezien het onmogelijk is, de reactie onder menschelijke contrôle te brengen. Immers, positronen kunnen niet in stand gehouden worden, omdat zij zich onmiddellijk na hun ontstaan vereenigen met electronen, die overal en in alle stoffen aanwezig zijn. Wanneer men dus onder atoomenergie de energie verstaat, die vrij zou komen, wanneer het geheele atoom verdwijnt, dan geeft de physica ons niet de minste hoop, dat zulks in de practijk ooit mogelijk zou worden.

Wanneer men echter onder atoomenergie die energie verstaat, waarover men de beschikking krijgt, wanneer men de geweldige krachten kon benutten, die de deelen der atoomkernen bijeenhouden, dan krijgt het probleem een ander aanzien. In de eerste plaats echter moet naar voren worden gebracht, dat men uit den aard der zaak geen energie kan verkrijgen door een atoomkern in haar deelen te splitsen, aangezien voor zulk een splitsingsproces juist energie noodig is. De juiste weg zou zijn, atoomkernen op te bouwen uit protonen en neutronen, aangezien daarbij energie vrij komt, namelijk de bindingsenergie, die geleverd wordt door de bindingskrachten, wanneer de deeltjes zich aaneensluiten tot kernen. Deze energie, die overeenkomt met het massaverlies der kernen bij opbouw uit haar bestanddeelen, is wel is waar ongeveer 100 maal kleiner dan die, welke met de geheele massa der atomen overeenkomt, maar toch van een niet te beseffen omvang. Zulk een opbouwproces van atoomkernen zou in principe geheel analoog zijn aan de chemische processen, die energie vrij maken

bij de verbranding van koolstof of waterstof. Bij verbranding van koolstof gaan de atomen daarvan een verbinding aan met zuurstofatomen uit de lucht, en vormen daarbij kooldioxyde. Dit proces verloopt onder afgifte van warmte, doordat tusschen de koolstof- en de zuurstofatomen, wanneer zij dicht genoeg bij elkaar gebracht worden, sterke aantrekkende krachten optreden van electrischen aard. Het omgekeerde proces, waarbij kooldioxyde ontleed wordt in koolstof en zuurstof eischt daarentegen een groote hoeveelheid energie voor het winnen der aantrekkende krachten. Hoewel op dit verbrandingsproces een groot gedeelte van de energievorming op aarde berust, aangezien koolstof een belangrijk bestanddeel is van steenkolen, hout, olie en benzine, is toch de energievorming, gezien met het oog van een atoomphysicus, uiterst bescheiden. Voor ieder atoom koolstof, dat verbrandt, bedraagt de energieontwikkeling slechts 4 electron-Volt, een waarde, die de orde van grootte bezit van de bindingsenergie der buitenelectronen in het atoom. De chemische eigenschappen, die de verbranding beheerschen, werden immers juist bepaald door de buitenelectronen. Wanneer de verbranding van koolstof nochtans in de practijk een bruikbare hoeveelheid energie levert, komt dat, doordat gemeenlijk alle atomen van het gebruikte stuk kool aan de verbranding deelnemen.

Wanneer men nu atoomenergie wil winnen door protonen en neutronen zich met elkaar te laten vereenigen, zou men voor iederen keer geheel andere bedragen krijgen, daar de aantrekkende krachten tusschen deze deeltjes heel wat grooter zijn dan die tusschen de atomen. Bij de vorming van een heliumkern uit twee protonen en twee neutronen wordt bijvoorbeeld een

energie vrij gemaakt van niet minder dan 28 millioen Volt, en het is daarom een verlokkende gedachte, na te gaan, of het mogelijk is, atoomkernen op te bouwen door de „verbranding" van elementairdeeltjes.

Eerst dienen wij dan te onderzoeken, of de brandstof, dus de protonen en neutronen, beschikbaar is in voldoende hoeveelheden. Wat de protonen betreft is de zaak gemakkelijk genoeg: men behoeft slechts een cylinder gecomprimeerde waterstof te koopen. Daarentegen strandt de onderneming op het feit, dat voor de neutronen iets dergelijks geldt als voor de positronen: vrije neutronen worden automatisch door atoomkernen opgenomen, wel is waar onder vrijmaking der bindingsenergie, maar helaas zoo, dat het proces aan menschelijke contrôle ontsnapt. Hoewel de helft van het gewicht der aarde gevormd wordt door neutronen, komen er in de natuur geen vrije deeltjes voor. Men kan ze slechts verkrijgen door kernsplitsingen, en daarvoor is juist de energie noodig, die wij trachten vrij te maken. Overgebracht op het voorbeeld der gewone brandstoffen, zou het er op neer komen, dat alle koolstof reeds verbrand was tot kooldioxyde. Dus is ook deze werkwijze onmogelijk door gebrek aan brandstof. Nochtans behoeven wij niet geheel en al den moed te verliezen, want al kan dan geen energie gewonnen worden door directen opbouw der kernen uit haar bestanddeelen, zoo blijft de mogelijkheid toch nog open, energie te winnen door de vorming van zwaardere kernen uit lichtere, of, meer algemeen gezegd, van kernen met groote bindingsenergie uit die met geringere.

Een voorbeeld van zulk een proces, waarbij α-deeltjes met groote bewegingsenergie vrij komen, hebben wij reeds ontmoet in den vorm van de door Cockcroft en

Walton verrichte splitsing van lithium in α-deeltjes door beschieting met protonen:

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} = {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He},$$

welke reactie zich kenmerkt door de groote energie-ontwikkeling van 17 millioen Volt. Herhalen wij de berekening op grond der nauwkeurige atoomgewichten, voor waterstof 1,00813, voor helium 4,00389 en voor lithium 7,01818, dan wordt het massadefect bij de reactie 0,01853, welke waarde, vermenigvuldigd met het beroemde getal 931 (zie pagina 185) een energie van 17,25 millioen Volt oplevert. De energiewinst bij iedere splitsing bedraagt dus 17,25 millioen Volt minus de paar honderdduizend Volt bewegingsenergie der protonen. De splitsing van lithium is nog steeds een der processen, waarbij de grootste hoeveelheden energie gewonnen worden, reden waarom wij ons in onderstaande beschouwingen aan dit proces zullen houden.

Het probleem is dus thans gereduceerd tot het vraagstuk, een apparaat te construeeren, waarmede men op groote schaal waterstof- en lithiumkernen op elkaar kan laten inwerken, ten einde de vrijkomende energie te benutten. Het is dus duidelijk, dat bij de proef van Cockcroft en Walton, hoewel iedere atoomsplitsing inderdaad met een groote energie-ontwikkeling gepaard gaat, in werkelijkheid geen winst te boeken is, aangezien de kans, dat een lithiumkern getroffen wordt, zoo gering is, dat slechts één proton op vele honderdduizenden een kernsplitsing teweeg brengt. Wil men werkelijk energie produceeren, dan moet het leidende beginsel zijn, dat de bij iedere kernsplitsing vrijkomende energie gebruikt wordt om andere lithiumkernen te verbrijzelen.

Men moet dus met andere woorden een situatie nastreven gelijk aan die, welke bij verbranding van koolstof optreedt. Het is een welbekend feit, dat een kit met kolen niet uit zichzelf in brand vliegt, ook al is zij aan de zuurstof der lucht blootgesteld, doch dat de verbranding eerst een aanvang neemt, nadat een der stukken kool verhit is tot het vlampunt. Wanneer het verbrandingsproces eenmaal ingeleid is, zorgt de bij de verbranding vrijkomende energie er voor, dat ook de omgevende stukken kool het vlampunt bereiken, enz. Volgens de beschouwingen over den aard der warmte, in de inleiding genoemd, vertegenwoordigt het vlampunt van een stuk kool slechts de temperatuur, waarbij zuurstof- en koolstofatomen over voldoende bewegingsenergie beschikken, bij onderlinge botsingen elkaar zoo nabij te komen, dat de aantrekkingskrachten tusschen de atomen de chemische reacties tot stand brengen.

Men zou zich dus misschien kunnen voorstellen, een overeenkomstige „kernchemische" reactie te bewerkstelligen door een reservoir met lithium en waterstof te vullen, en dit mengsel „aan te steken" door er zooveel snelle protonen in te zenden, dat om te beginnen een enkel lithiumatoom ontleed werd in twee snelle α-deeltjes. Verder fantaseerende zou men zich kunnen voorstellen, dat deze α-deeltjes bij botsingen zooveel energie afleverden aan eenige der aanwezige waterstofkernen, dat deze nieuwe kernsplitsingen veroorzaakten, waarna het proces zich al sneller en sneller zou uitbreiden, tot al het aanwezige lithium omgezet was en ongeloofelijke hoeveelheden energie waren vrijgekomen.

Doch weer is er een fout in de rekening, namelijk

deze, dat zoowel de α-deeltjes als de protonen onder normale omstandigheden veel grootere kansen hebben, hun energie af te geven aan buitenelectronen dan aan de kern, zoodat het overgroote deel der partikels zijn energie zal verliezen aan het ioniseeren van atomen. Het fundamenteele van deze omstandigheid blijkt ook uit iedere condensatiekamerphoto van α-deeltjes, (zie figuur 29), waarop te zien is, dat verreweg de meeste α-deeltjes afgeremd worden zonder een atoomkern te bereiken.

Het schijnt dus vrijwel onmogelijk, onder normale omstandigheden te bereiken, dat de reactie zich vanzelf tot andere kernen uitbreidt. Terwijl een chemisch proces als verbranding van koolstof geen moeilijkheden ondervindt bij het om zich heen grijpen, aangezien de atomen kort bij elkaar liggen zonder tusschenruimte van beteekenis, wordt de kernverbranding een fiasco met als hoofdoorzaak, dat de kernen onder normale omstandigheden beschermd worden door haar electronensystemen. Daar de lineaire afmeting van een kern slechts 10^{-12} cm bedraagt tegen die van een atoom 10^{-8} cm, is het atoom 10.000 maal zoo groot als de kern en moet het electronensysteem dus een volume bezitten, dat $10.000 \times 10.000 \times 10.000 = 10^{12}$ keer zoo groot is als het volume der kern. Toch zijn het slechts de kernen, waar het om te doen is bij de „kernverbranding", terwijl de electronen de zaak in de war sturen, door onmiddellijk de geproduceerde energie te absorbeeren. In grove trekken kan de situatie dus in beeld gebracht worden door de voorstelling, dat men een milliard kubieke meters zand heeft, gemengd met een kubieken decimeter koolstof, en dat men trachten zou, dit mengsel van 1 kubieken kilometer aan te steken. Iedereen

zal onmiddellijk het hopelooze van deze onderneming inzien. Wel is waar hebben wij in het voorgaande slechts één bepaalde kernreactie besproken, maar de beschouwingen bezitten algemeene geldigheid voor al de tot nu toe bekende kernprocessen, zoodat eventueel geinteresseerde technici teleurgesteld moeten worden door de mededeeling, dat een technische tennuttemaking van de energie der atoomkernen zoo onwaarschijnlijk is, dat zij bijna aan onmogelijkheid grenst.

Daarentegen is er veel, dat er op duidt, dat elders in het heelal, met name in het inwendige der sterren, dusdanige omstandigheden heerschen, dat energieontwikkeling uit kernreacties op groote schaal plaats vindt. Wel is waar is het onmogelijk om metingen te verrichten van het inwendige der sterren, maar de astrophysici zijn er, met behulp van methodes, die hier niet nader besproken kunnen worden, in geslaagd, de massa en de grootte der sterren vast te stellen, alsmede de hoeveelheid energie, die in een bepaald tijdsverloop in de wereldruimte uitgezonden wordt. Dergelijke waarnemingen van sterren in verschillende ontwikkelingsphasen hebben geleid tot de veronderstelling, dat een ster onder haar regelmatige uitstraling van energie gedurende schier eindeloos lange tijdsruimten, zich geleidelijk samentrekt, terwijl die samentrekking vergezeld gaat van energie-ontwikkeling. Nauwkeurige berekeningen van dit verschijnsel hebben echter aangetoond, dat de contractie alleen niet voldoende is om de enorme hoeveelheden energie voort te brengen, die een ster uitstraalt. De zon bijvoorbeeld zou bij de uitstraling gedurende den tijd, dat zij reeds bestaat, reeds lang afgekoeld moeten zijn, wanneer zij niet over een andere energiebron dan de samentrekking beschikte.

Vele astro-physici zijn daarom geneigd aan te nemen, dat de geheime energieproductie te danken is aan kernreacties van verschillenden aard, waarbij atoomkernen met geringe bindingsenergie omgezet worden in kernen met groote. Deze processen zouden echter niet overal op of in de ster plaats vinden, doch slechts in een betrekkelijk klein gebied nabij het middelpunt, waar zoo geweldig hooge drukken en temperaturen moeten heerschen, dat kernreacties op groote schaal mogelijk zijn. Terwijl de temperatuur aan de oppervlakte eener ster blijkens metingen eenige duizenden graden bedraagt, kan men berekenen, dat in het middelpunt temperaturen van verscheidene millioenen graden en drukken van ettelijke millioenen atmospheren kunnen heerschen. Bij dusdanig hooge temperaturen bezitten alle atomen een geweldige bewegingsenergie, zoodat zij bij onderlinge botsingen veel grootere kansen hebben, kernreacties te veroorzaken. Deze kansen worden nog vergroot door een hoogen druk, die oorzaak is, dat de deeltjes veelvuldig met elkaar in botsing komen.

Er is dus alle aanleiding te vermoeden, dat het produceeren van atoomenergie op groote schaal geen physische onmogelijkheid is, maar slechts kan geschieden onder dusdanige bijzondere voorwaarden, dat er bitter weinig hoop is, ze op aarde te vervullen. De hoogste temperatuur, die men tot nu toe in het laboratorium bereikt heeft, bedraagt ongeveer 4000° C., hetgeen zeer ver verwijderd is van de millioenen graden der sterren. En zelfs wanneer men er in slaagde, die hooge temperatuur te bereiken, dan nog zou men op de onoverkomelijke moeilijkheid stuiten, dat men niet over eenig materiaal beschikt, om er machines van te maken, daar

elke stof bij deze temperatuur oogenblikkelijk zou verdampen.

Toch is het eigenaardig te bedenken, dat een groot deel der energie, die de aarde ontvangt, en heeft ontvangen van de zon, de energie, die noodig is voor het in stand houden van het leven, en die uit steenkoollagen en waterwerken naarstig teruggewonnen wordt, voor zoover zij niet dadelijk werd gebruikt of ontweek in de wereldruimte, naar alle waarschijnlijkheid te danken is aan de veel besproken atoomenergie, in de laboratoria der menschen een utopie, doch rijkelijk stroomend uit de machtige werkplaatsen der Natuur.

BESLUIT

Wij hebben thans de ontwikkeling der atoomphysica gevolgd van de eerste ontdekkingen af, die een blik verschaften in de wereld der atomen, tot aan de sensationeele ontdekkingen aangaande de structuur der atoomkernen.

Deze snelle ontwikkeling, voltrokken binnen den tijd van een menschenleven, is slechts mogelijk geworden doordat een groot aantal mannen der wetenschap hun leven gewijd hebben aan het oplossen dezer, voor een goed begrip der natuur onmisbare, problemen. Wij hebben getracht aan te toonen, welke beteekenis de wisselwerking tusschen en het samengaan van het experimenteele en het zuiver theoretische onderzoek gehad hebben voor de ontwikkeling. Uit den aard der zaak is het niet mogelijk geweest, de vele détailonderzoekingen te vermelden, waarmede alle ontdekkingen ondersteund en bevorderd werden: wij hebben ons moeten bepalen

tot die werkzaamheden, die aangemerkt moeten worden als pioniersarbeid, alsmede tot het noemen der namen van slechts die onderzoekers, wier namen voor alle tijden verbonden zullen blijven aan dit aan belangrijke gebeurtenissen zoo rijke hoofdstuk uit de geschiedenis der natuurkunde. Toch mag niet verzuimd worden, de groote beteekenis naar voren te brengen van het completeeringswerk, dat verricht werd door een leger minder bekende wetenschapsmannen, wier lot het niet was, de allergrootste ontdekkingen te doen, maar die onvermoeid voortgingen, steeds de resultaten en de methodes te verbeteren.

Ten slotte moge, in naam der waarheid, niet onvermeld blijven, dat ook de geschiedenis der atoomphysica haar vergissingen en dwaalwegen gekend heeft, doch dit is nu eenmaal de wijze, waarop de wetenschap niet zelden moet trachten verder te komen. Zulke vergissingen hebben trouwens in den regel niet de gelegenheid gekregen zich lang te handhaven, aangezien er steeds een groot aantal onderzoekers klaar stond, de nieuwe ontdekkingen of theorieën nader te onderzoeken of te becritiseeren. Dergelijke episoden uit de ontwikkeling der atoomphysica hebben wij in ons overzicht onvermeld moeten laten, dat daardoor misschien geen zuiver beeld geeft van de vele moeilijkheden, die overwonnen moesten worden. Toch geldt het voor alle natuurwetenschappen en zeer in het bijzonder voor de natuurkunde, dat zij nooit zulke groote vergissingen kunnen begaan als op gebieden van het geestesleven wel mogelijk zijn, aangezien de physica zich bezig houdt met de onveranderlijke wetten der natuur, die zich onafhankelijk van den mensch doen gelden. Het is trouwens deze omstandigheid, die de natuurwetenschap steeds een aan-

tal ijverige beoefenaars en geestdriftige aanhangers zal verzekeren.

Al hebben wij in dit opzicht de meeste aandacht besteed aan het zuivere natuurverschijnsel en aan de wisselwerking tusschen theorie en experiment, toch hebben wij nu en dan gelegenheid kunnen vinden, te wijzen op de wisselwerking tusschen physica en techniek, die velen als de hoofdzaak beschouwen vanwege de stoffelijke geneugten, die daardoor voor den mensch geschapen worden. Het behoeft hier nauwelijks herhaald te worden, dat de klassieke mechanica een belangrijk deel van het fundament vormt, waarop de hoog ontwikkelde techniek onzer dagen berust. De moderne atoomphysica echter is zóó jong, dat de techniek zeker nog niet ten volle haar ontdekkingen heeft uitgebuit. Toch kan er reeds op een lange reeks practische resultaten gewezen worden, zooals bijvoorbeeld het gebruik der Röntgenstralen en der radio-actieve stoffen in de geneeskunde, van electronen bij radio, televisie en geluidsfilm, en, als een der laatste, van de kunstmatige radio-actieve stoffen. Dit echter is slechts een der zijden van de wisselwerking tusschen physica en techniek; de andere wordt gevormd door de steeds betere hulpmiddelen, die de techniek den onderzoekers verschaft voor het tot oplossing brengen hunner problemen. Een duidelijke voorstelling hiervan verkrijgt men, wanneer men de verslagen leest van oudere physische onderzoekingen, waaruit blijkt, dat de experimentators veel moeite en tijd moesten offeren aan het construeeren van meetinstrumenten en toestellen, die men thans voor een fractie van den prijs kant en klaar, en in den regel van beter kwaliteit of grooter nauwkeurigheid, uit den handel betrekt. Daarmede heeft de techniek voor een

groot gedeelte de schuld, die zij aan de physica heeft, betaald.

Evenwel, het moet tot slot duidelijk naar voren worden gebracht, dat de physica niet beoefend wil zijn uitsluitend met het oog op resultaten, die dadelijk een practische toepassing kunnen vinden. Het gaat integendeel vaak zoo, dat die resultaten welke het verst verwijderd schijnen van de eischen van het practische leven, ten langen leste blijken de grootste beteekenis te krijgen, ook wat de toepassing in de techniek betreft. Daarom dient men zoowel de physica als de techniek het best, door de natuurkundigen rustig hun eigen wegen te laten gaan, wegen, die ingeslagen worden uit het verlangen tot kennis van de wonderlijke wetten en het rijke leven, dat zelfs de zoogenaamde doode natuur beheerscht en doordringt.

NAAMLIJST VAN DE BELANGRIJKSTE IN DE ATOOMPHYSICA GEBRUIKELIJKE DEELTJES

Molecuul, het kleinste deel van een chemische verbinding, dat nog de eigenschappen dier verbinding bezit.

Atoom, het kleinste deel van een element, dat nog de eigenschappen van dit element bezit.
Een atoom bestaat uit een kern en een electronensysteem.

Proton, kern, van een waterstofatoom; een elementairdeeltje met 1 positieve elementairlading en een massa van $1{,}6 \times 10^{-24}$ g. Protonen zijn bouwsteenen van alle atoomkernen.

Neutron, elementairdeeltje zonder electrische lading en met een massa van $1{,}6 \times 10^{-24}$ g.
Neutronen zijn bouwsteenen van alle atoomkernen.

Electron, elementairdeeltje met 1 negatieve elementairlading en met een massa, die 1838 maal zoo klein is als die der protonen en neutronen.
Electronen komen in het electronensysteem van alle atomen voor.

Positron, elementairdeeltje met 1 positieve elementairlading en met dezelfde massa als een electron.
Het heeft een beperkten levensduur; het vereenigt zich met electronen onder vorming van γ-stralen.

α-deeltje, kern van een heliumatoom, bestaande uit 2 protonen en 2 neutronen.

Deuteron, kern van een zware waterstofatoom.
Het bestaat uit 1 proton en 1 neutron.

Quant, het kleinste gedeelte van een electromagnetische energiestraling.
Een quant is gelijk aan het product van Plancksche constante en de frequentie der straling.